

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lovro Frković

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.

Student:

Lovro Frković

Zagreb, 2018.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Lovro Frković

Mat. br.: 0035200918

Naslov rada na

hrvatskom jeziku: **Ispitivanje izotermalne komore**

Naslov rada na

engleskom jeziku: **Testing of isothermal chamber**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja izotermalne komore u području od 10 °C do 60 °C. Postupak treba obuhvatiti određivanje prostornih temperaturnih gradijenata, stalnosti temperature i dinamike zagrijavanja. Za ispitivanje će se koristiti postojeće mjerne linije u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM). Potrebno je:

- Izraditi pregled teorijskih osnova za ispitivanja izotermalnih termometrijskih komora.
- Opisati postupak za procjenu mjerne nesigurnosti, kako samog ispitivanja tako i utjecaja rezultata na ukupnu mjernu nesigurnost usporedbenog umjeravanja termometara.
- Definirati ispitni postupak za ispitivanje i karakterizaciju termometrijske komore, što uključuje utvrđivanje horizontalnih i vertikalnih gradijenata temperature, stalnosti i dinamike zagrijavanja.
- Sastaviti mjernu liniju za ispitivanje koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM. Dati opis sheme spajanja ispitnog sustava sa pomoćnim uređajima.
- Izraditi opis postupka ispitivanja.
- Priložiti primjere u obliku rezultata ispitivanja na ispitnim točkama od 10 °C, 30 °C i 60 °C s procijenjenim doprinosima zona ukupnoj mjernoj nesigurnosti usporedbenog umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. travnja 2018.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadali:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić

Šestan

dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se voditelju rada prof. dr. sc. Davoru Zvizdiću na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Danijelu Šestanu na velikoj pomoći prilikom izvođenja praktičnog dijela završnog rada, savjetima, strpljenju i materijalima koje mi je ustupio.

Lovro Frković

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	5
POPIS SLIKA.....	7
POPIS TABLICA.....	8
POPIS OZNAKA.....	9
SAŽETAK.....	10
1. UVOD.....	11
2. UMJERAVANJE TERMOMETARA I ISPITIVANJE IZOTERMALNE KOMORE.....	12
3. KORIŠTENA OPREMA.....	13
3.1. Kupka (tekup11).....	13
3.2. Izotermalna komora.....	15
3.3. Oprema za mjerenje otpora termometara (EOMOS03/01, EOMOS03/03, EOFIX06).....	17
3.4. Otpornički termometri.....	19
3.5. Osobno računalo.....	20
4. UMJERAVANJE TERMOMETARA.....	21
4.1. Rezultati mjerenja.....	23
4.2. Izračun koeficijenata.....	24
4.3. Procjena nesigurnosti umjeravanja termometara.....	26
5. METODA ISPITIVANJA : ISPITIVANJE IZOTERMALNE KOMORE KORIŠTENJEM UMJERENIH TERMOMETARA.....	27
5.1. Temperature ispitivanja.....	28
5.2. Temperaturni gradijenti.....	28
5.3. Zona umjeravanja.....	29
5.4. Prostorna nehomogenost temperature.....	29
5.5. Ispitivanje vremenske nestabilnosti.....	31
5.6. Stabilnost temperature.....	32
5.7. Dinamika zagrijavanja/hlađenja.....	33
6. UPUTA ZA ISPITIVANJE TERMOSTATIRANIH KOMORA.....	33
6.1. Osnovni podaci o uputi.....	34
6.2. Potrebna mjerna oprema.....	34
6.3. Uvjeti mjerenja.....	34
6.4. Priprema mjerenja.....	35
7. Slijed testiranja.....	36

7.1. Mjerenje prostorne nehomogenosti i utjecaja zračenja.....	36
7.2. Mjerenje vremenske nestabilnosti.....	36
8. Obrada rezultata mjerenja.....	37
8.1. Prostorna nehomogenost.....	37
8.1.1. Prostorna nehomogenost temperature.....	37
8.2. Vremenska nestabilnost.....	38
8.2.1. Vremenska nestabilnost temperature.....	38
8.3. Nesigurnost etalonskih mjernih uređaja.....	39
8.3.1. Uređaji za mjerenje temperature u radnom volumenu komore.....	39
8.4. Vrijednost postavljena na regulatoru temperature ispitivane termostatisane komore.....	39
8.5. Izračun doprinosa mjernoj nesigurnosti.....	40
9. Ispitivanje komore u LPM.....	41
9.1. Postupak ispitivanja.....	41
9.2. Rezultati ispitivanja.....	42
9.3. regulator temperature u komori uključen, a izmjenjivači nisu napajani vodom iz kupke.....	43
9.3.1. Postavljena temperatura zraka u komori 10 °C.....	43
9.3.2. Postavljena temperatura zraka u komori 30 °C.....	45
9.3.3. Postavljena temperatura zraka u komori 60 °C.....	47
9.4. regulator temperature u komori uključen, a izmjenjivači nisu napajani vodom iz kupke.....	49
9.4.1. Postavljena temperatura zraka i vode u komori 10 °C.....	50
9.4.2. Postavljena temperatura zraka i vode u komori 30 °C.....	52
9.4.3. Postavljena temperatura zraka i vode u komori 60 °C.....	54
9.5. regulator temperature u komori isključen, a izmjenjivači napajani vodom iz kupke.....	56
9.5.1. Postavljena samo temperatura vode u komori 10 °C.....	56
9.5.1. Postavljena samo temperatura vode u komori 30 °C.....	58
9.5.1. Postavljena samo temperatura vode u komori 60 °C.....	60
9.6. Ukupne nesigurnosti komore.....	62
10. Zaključak.....	63
LITERATURA.....	64

POPIS SLIKA

Slika 1. Heto Calibration KB22 - 1 termostatisirana kupka.....	14
Slika 2. Calcon 2000 regulator temperature.....	14
Slika 3. Izotermalna komora.....	16
Slika 4. Jumo quancontrol LC300 regulator temperature.....	16
Slika 5. Termometrijski otpornički most (spojene sve navedene komponente)...	19
Slika 6. Prozor za grafički prikaz podataka programa za nilježenje očitavanja otpornih mostova.....	20
Slika 7. Izotermalni blok za termostatisirane kupke.....	21
Slika 8. Termometri uronjeni u izotermalni blok.....	22
Slika 9. Prikaz kupke, izotermalnog bloka i uronjenih termometara.....	22
Slika 10. Grafički prikaz funkcije otpora i temperature za termometar na kanalu 0.....	25
Slika 11. Prikaz temperaturnih gradijenata.....	28
Slika 12. Shema razmještaja termometara po radnom volumenu komore.....	30
Slika 13. Prikaz razmještaja termometara po radnom volumenu komore.....	31
Slika 14. Temperaturni tok referalnog termometra na zadanim ispitnim temperaturama.....	32
Slika 15. Položaj termometara unutar korisnog prostora komore.....	41
Slika 16. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	43
Slika 17. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	45
Slika 18. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	47
Slika 19. Prikaz izmjenjivača unutar komore napajanih vodom iz kupke.....	49
Slika 20. Prikaz kupke i uronjenih pumpi koje su omogućile cirkulaciju vode kroz izmjenjivače.....	49
Slika 21. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	50
Slika 22. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	52
Slika 23. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	54
Slika 24. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	56
Slika 25. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	58
Slika 26. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	60

POPIS TABLICA

Tablica 1. Specifikacije kupke TEKUP11.....	13
Tablica 2. Specifikacije izotermalne komore.....	15
Tablica 3. Specifikacija komponente EOMOS03/01.....	17
Tablica 4. Specifikacije komponente EOMOS03/02.....	18
Tablica 5. Specifikacije komponente EOMOS03/03.....	18
Tablica 6. Specifikacije etalonskog termometra.....	19
Tablica 7. Ovisnost otpora pojedinog termometra o referentnoj temperaturi.....	23
Tablica 8. Vrijednost koeficijenata A, B i C.....	24
Tablica 9. Nesigurnost određivanja temperature zone kontrolirane temperature.....	26
Tablica 10. Prikaz osnovnih podataka o ispitivanju.....	42
Tablica 10.1. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka na komori na 10 °C.....	43
Tablica 11. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 10 °C.....	44
Tablica 12. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka na komori na 30 °C.....	45
Tablica 13. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 30 °C.....	46
Tablica 14. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka na komori na 60 °C.....	47
Tablica 15. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 60 °C.....	48
Tablica 16. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 10 °C.....	50
Tablica 17. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 10 °C.....	51
Tablica 18. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 30 °C.....	52
Tablica 19. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 30 °C.....	53
Tablica 20. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 60 °C.....	54
Tablica 21. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 60 °C.....	55
Tablica 22. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom vode u komori na 10 °C.....	56
Tablica 23. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu vode u komori postavljenu na 10 °C.....	57
Tablica 24. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom vode u komori na 30 °C.....	58
Tablica 25. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu vode u komori postavljenu na 30 °C.....	59
Tablica 26. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom vode u komori na 60 °C.....	60
Tablica 27. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu vode u komori postavljenu na 60 °C.....	61

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
ϑ_{ref}	$^{\circ}\text{C}$	temperatura referentnog termometra
u_{hor}	mK	mjerna nesigurnost u horizontalnom smjeru
u_{vert}	mK	mjerna nesigurnost u vertikalnom smjeru
u_{hom}	mK	ukupan doprinos homogenosti na mjernu nesigurnost
u_{stab}	mK	ukupan doprinos stabilnosti na mjernu nesigurnost
u_{zone}	mK	mjerna nesigurnost zone
R	Ω	otpor
A	$^{\circ}\text{C}$	koeficijent Callendar Van Dusen jednadžbe
B	$^{\circ}\text{C}^{-2}$	koeficijent Callendar Van Dusen jednadžbe
C	$^{\circ}\text{C}^{-3}$	koeficijent Callendar Van Dusen jednadžbe
n		broj termometara

SAŽETAK

U radu je osnovni zadatak bio definirati i provesti ispitivanje karakteristika i opisati način rada izotermalne komore u zadanom temperaturnom području od 10 °C do 60 °C. Rad obuhvaća određivanje prostornih (horizontalnih i vertikalnih) temperaturnih gradijenata, stalnost temperature i dinamiku zagrijavanja. U svrhu dobivanja što točnijih rezultata ispitivanja izotermalne komore, prethodno je bilo potrebno umjeriti termometre koji su se kasnije koristili u procesu ispitivanja komore. Termometre je potrebno periodički umjeravati kako bi se dokazala njihova točnost i vremenska stabilnost, a ako je došlo do značajnijih promjena treba izvršiti korekciju greške. Termometri su umjereni u kupki, gdje su bili smješteni u izotermalnom bloku.

Nadalje, objašnjena je mjerna nesigurnost, uzroci nastanka mjerne nesigurnosti te su pojašnjeni tipovi procijene mjerne nesigurnosti, te način izračunavanja standardne i proširene mjerne nesigurnosti. U radnoj uputi dani su osnovni podaci o ispitivanju, uvjeti mjerenja, oprema potrebna za mjerenje, način pripreme mjerenja i slijed provođenja testiranja za sve metode ispitivanja komora. Uputa također sadrži formule potrebne za obradu rezultata mjerenja i izračun mjernih nesigurnosti te proširene mjerne nesigurnosti. Sastavni dio upute je primjer izvješća o ispitivanju izotermalne komore, koja se koristi u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM), a na kojoj je izvršeno ispitivanje prema napisanoj uputi o ispitivanju izotermalnih komora.

Izotermalne komore ispituju se zbog utvrđivanja homogenosti temperature, stalnosti temperature i dinamike zagrijavanja, koji ujedno i određuju kvalitetu same komore. Komore moraju osigurati područje uniformne temperaturne distribucije u koje će biti moguće umetnuti ispitivani termometar i etalonski termometar zajedno. U radu je prikazana metoda provjere navedenih parametara. Na kraju rada izloženi su primjeri u obliku rezultata ispitivanja u zadanim ispitnim točkama koji su popraćeni grafovima i tablicama.

1. UVOD

Izotermalne komore za ispitivanje imaju zatvoreni radni prostor s određenim stupnjem uniformnosti temperature. Radni prostor može biti manji od stvarnog unutarnjeg volumena komore i predstavlja ograničeni prostor unutar komore unutar kojeg su zadovoljeni određeni zahtjevi za uniformnošću temperature.

Intenzivno se koriste u gotovo svakom laboratoriju ili proizvodnom postrojenju. Komore se koriste za osiguravanje pouzdanosti industrijskih proizvoda, posebno elektroničkih komponenti i proizvoda koji su tijekom životnog vijeka dulje vrijeme izloženi jednom ili više specifičnih klimatskih uvjeta. Kalibracijski laboratoriji koriste izotermalne komore kao područje kontrolirane temperature za usporedbeno umjeravanje termometara.

Upravo zbog velike važnosti uniformnosti i točnosti uvjeta temperature zraka u prostoru komore, stvorila se potreba za ispitivanjem radnih karakteristika izotermalnih komora. Ispitivanje radnih karakteristika izotermalnih komora mora biti sastavni dio svih sustava kontrole kvalitete u svakom laboratoriju ili u svakom proizvodnom pogonu koji koristi takav tip komore. Još uvijek ne postoji uniformno rješenje za postupak kojim bi se provodilo ispitivanje takvih uređaja, te upravo zbog toga postoji velika potreba za određivanjem postupka kojim bi se s velikom sigurnošću i ponovljivošću moglo provesti ispitivanje bilo koje komore neovisno o radnim karakteristikama iste.

Kupke se najčešće koristi prilikom postupka umjeravanja termometara. Postoje različite vrste kupki, koje se razlikuju po obliku i veličini odnosno volumenu radnog medija. Ovisno o zadanim temperaturnim područjima u kojima kupke rade, kao radni medij mogu se koristiti voda, silionsko ulje, alkohol itd. Svaka kupka ima svoj sustav hlađenja i grijanja koji održava zadanu temperaturu radnog medija. Rad cijelog sustava regulira kontrolni uređaj koji održava temperaturu radnog medija u željenom temperaturnom području. Također, kupka mora imati ugrađenu miješalicu za cirkulaciju radnog medija. Uz pomoć kupke umjereno je 10 termometara kojima se kasnije ispitivao rad izotermalne komore na temperaturnim točkama od 10 °C, 30 °C i 60 °C pri čemu su se odredili prostorni temperaturni gradijenti, stalnost temperature i dinamike zagrijavanja. Metoda kao i rezultati mjerenja bit će detaljnije opisani i razrađeni u nastavku.

2. UMJERAVANJE TERMOMETARA I ISPITIVANJE IZOTERMALNE KOMORE

Svrha ispitivanja izotermalnih komora je utvrđivanje njihovih svojstava pri različitim režimima rada. Informacije o svojstvima komore iz kataloga i tehničkih specifikacija proizvođača često nisu dovoljno precizni i pouzdane pa mjeriteljski laboratoriji provode vlastita ispitivanja. Problem leži u tome što još ne postoji standardizirani i opće prihvaćeni postupak ispitivanja, već mjeritelji sami na temelju potreba odabiru najpogodniju metodu.

Najvažnija svojstva komore su temperaturna homogenost i vremenska stabilnost. Izotermalna komora ispitivana je na ispitnim točkama od 10 °C, 30 °C i 60 °C. Uz određena svojstva komore moguće je odrediti dinamiku zagrijavanja i hlađenja. Ovisno o konstrukciji pojedine komore, prvenstveno o veličini, izolaciji i načinu cirkulacije medija, vidljiva je međusobna razlika u homogenosti temperature. Važno je napomenuti da se neovisno o svemu navedenome unutar medija uvijek javljaju prostorne razlike temperatura (temperaturni gradijenti).

3. KORIŠTENA OPREMA

Korišteni nazivi u naslovima odjeljaka su interne oznake pojedinih dijelova opreme u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

3.1. Kupka (TEKUP11)

Ova termostatisirana kupka korištena je prilikom umjeravanja termometara. Karakteristike kupke prethodno su utvrđene ispitivanjem. Tehničke specifikacije kupke prikazane su u sljedećoj tablici:

Proizvođač	Heto Calibration	
Model	KB 22 – 1	
Temperaturno područje	alkohol	-90 °C do 5 °C
	voda	5 °C do 90 °C
	silikonsko ulje	90 °C do 300 °C
Kapacitet radnog medija	8 litara	
Dimenzije	visina	1410 mm (960 mm)
	širina	450 mm
	dužina	415 mm
Dimenzije unutrašnjosti kupke	promjer	97 mm
	dubina	500 mm
Težina	115 kg	
Snaga	3 kW	
Napajanje	220 V; 50 Hz	

Tablica 1. Specifikacije kupke TEKUP11

Heto KB 22-1 je kupka visoke temperaturne stalnosti i homogenosti s ugrađenom jedinicom za grijanje i hlađenje. Deklarirana temperaturna stalnost kupke u čitavom njenom radnom području iznosi od $\pm 0,1$ °C do $\pm 0,001$ °C. Opremljena je Calcon 2000 regulatorom temperature visokih performansi s mikroprocesorom i PID regulacijom. Ovim regulatorom istog proizvođača moguće je podesiti parametre poput radne temperature i upozorenja za maksimalnu i minimalnu temperaturu. Minimalni korak kod odabira radne temperature iznosi 0,1 °C.



Slika 1. Heto Calibration KB 22 – 1 termostatisirana kupka



Slika 2. Calcon 2000 regulator temperature

3.2. Izotermalna komora

Izotermalna komora predmet je ispitivanja ovoga završnog rada. Kako bi izotermalnu komoru bilo moguće ispitati, moraju se zadovoljiti sljedeći uvjeti:

- Moraju postojati osjetnici temperature s pripadajućim indikatorima kao sastavni dijelovi komore.
- Moraju postojati kontrolni sustavi za vrijednosti koje se ispituju kao komponente komore.
- Mora postojati tehnička dokumentacija proizvođača.
- Mora postojati tehnička dokumentacija o kategoriji osjetnika; poželjne su informacije o poziciji i karakteristikama osjetnika, karakteristikama izolacije i načinu stabilizacije temperature.
- U komori mora vladati atmosferski tlak, tj. mora biti osigurano izjednačavanje tlaka u komori s tlakom okoliša.
- Za rad na jednom području temperature, ispitivanje je potrebno provesti na najmanje tri temperature unutar tog područja. Ispitivanje na samo jednoj temperaturi je dopustivo, ali je rezultat ispitivanja važeći samo za tu radnu točku i mora biti istaknuta u izvješću o ispitivanju.

Opis ispitivanja i vrijednosti mjerne nesigurnosti bit će obrađeni u nastavku. Tehničke specifikacije prikazane su u tablici:

Proizvođač	InkoLAB	
Model	Laboratorijski termostats hlađenjem, tip: BTF200EN	
Kapacitet radnog medija	200 litara	
Dimenzije	visina	1065 mm
	širina	725 mm
	dubina	600 mm
Dimenzije unutrašnjosti	širina	550 mm
	visina	800 mm
	dubina	450 mm

Tablica 2. Specifikacije izotermalne komore



Slika 3. Izotermalna komora

Komora je opremljena vlastitim JUMO QUANCONTROL LC300 regulatorom temperature. Cirkulacija radnog medija unutar komore, koji je u ovom slučaju bio zrak, osigurana je ventilatorima. Također ima predviđen ulazni i izlazni vod za pristup izmjenjivačima koji su smješteni po cjelokupnim površinama unutrašnjih ploha komore. Kroz izmjenjivače postoji mogućnost strujanja medija, koji će dodatno smanjiti postojeće temperaturene gradijente unutar komore.



Slika 4. JUMO QUANCONTROL LC300 regulator temperature

3.3. Oprema za mjerenje otpora termometara (EOMOS03/01, EOMOS03/02, EOMOS03/03, EOFIX06)

Oprema za mjerenje otpora termometara, korištena u ispitivanju, sastavljena je od sljedećih komponenti:

- ASL 158 (EOMOS03/01 - multipleksor)
- ASL 148 (EOMOS03/02 – komunikacijska i upravljačka jedinica multipleksora)
- ASL F700 (EOMOS03/03 – termometrijski otpornički most).

Za mjerenje otpora platinskih otpornih termometara odabran je izmjenični otporni most F700 proizvođača ASL Limited. Kako bi otporni most mogao mjeriti otpore više termometara, na njega je priključen multipleksor ASL 158 istog proizvođača.

Mjerenje otpora termometara omogućeno je kombinacijom mosta s multipleksorom i etalonskim fiksnim otporom. Komunikacijskim sučeljem GPIB most je spojen s računalom. Program LabView kontrolira rad multipleksora te očitava otpor s mosta i preračunava ga u pripadajuću temperaturu, te je on instaliran na računalu.

Karakteristike komponenti i izgled kompletnog mosta prikazane su tablicama i slikom.

Proizvođač	ASL	
Model	SB 158	
Napajanje	220/240 Vac	
Frekvencija	47 – 63 Vac	
Max Va	60 Va	
Dimenzije	visina	88 mm
	dužina	295 mm
	širina	442 mm
Težina	7 kg	

Tablica 3. Specifikacije komponente EOMOS03/01

Proizvođač	ASL	
Model	SB 148	
Napajanje	220/240 Vac	
Frekvencija	47 – 63 Vac	
Dimenzije	visina	133 mm
	dužina	295 mm
	širina	442 mm
Težina	7 kg	

Tablica 4. Specifikacije komponente EOMOS03/02

Multipleksor ASL SB 148 (EOMOS03/02) i ASL 158 (EOMOS03/01) omogućava proširenje mjernih mjesta na ukupno 10 kanala. Na svaki kanal može se spojiti po jedan termometar. ASL F700 (EOMOS03/03) omogućava izvođenje vrlo preciznih mjerenja. Jedan je od najzastupljenijih u svijetu otporničkih termometrijskih mostova u laboratorijima za umjeravanje.

Proizvođač	ASL	
Model	F 700	
Napajanje	240/220/120/100 Vac	
Frekvencija	50 – 60 Hz	
Dimenzije	visina	155 mm
	širina	520 mm
	dužina	466 mm
Težina	15 kg	
Radni uvjeti	0 °C – 30 °C, 10 % - 90 % RH	
Vrijeme mjerenja	10 sekundi za potpuni balans	
Linearnost	< ± 1 zadnja decimala	
Točnost	0,25 mK puni raspon/ 6 mK do 1064°C ovisno o otporu	

Tablica 5. Specifikacije komponente EOMOS03/03



Slika 5. Termometrijski otpornički most (spojene sve navedene komponente)

3.4. Otpornički termometri

U ispitivanju smo koristili otporničke termometre koji su predviđeni za ispitivanje izotermalne komore. Termometre je prije početka ispitivanja bilo potrebno umjeriti u kupki (TEKUP11) u temperaturnom području od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oblikom su predviđeni za umetanje u radni fluid ili u provrt u krutom tijelu. Povezuje se s termometrijskim otporničkim mostom pomoću dvije žice.

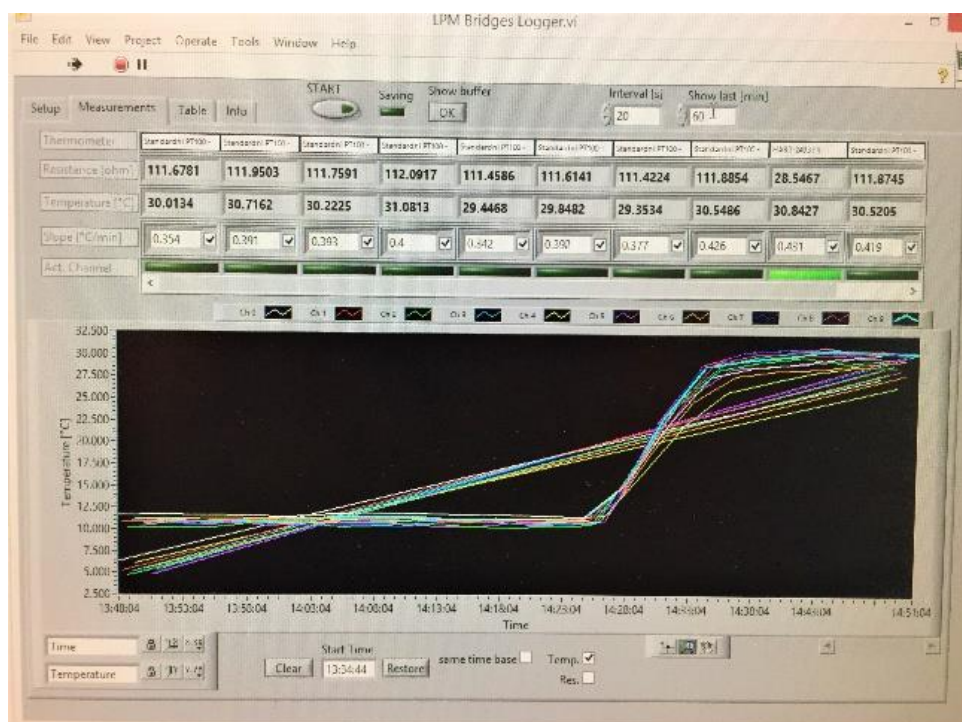
Kao etalonski termometar za umjeravanje ostalih devet Standardnih PT100-385 termometara odabran je štapni platinski otporni termometar proizvođača Hart Scientific.

Proizvođač	HART Scientific	
Model	5628	
Nominalni otpor	25.5 Ω	
Broj komada	1	
Dimenzije osjetnika	duljina	30 mm
Dimenzije zaštitne cijevi	Promjer	6.35 mm
	duljina	508 mm
Godišnja stabilnost	3 mK (i=1, i=2)	

Tablica 6. Specifikacije etalonskog termometra

3.5. Osobno računalo

Računalo smo koristili za kontrolu rada multipleksora i mosta, za očitavanja otpora s mosta i preračunavanje istih u pripadajuće temperature te za spremanje i obradu očitanih podataka. Program LabView kontrolira rad multipleksora te očitava otpor s mosta i preračunava ga u pripadajuću temperaturu, te je on instaliran na računalo.



Slika 6. Prozor za grafički prikaz podataka programa za bilježenje očitavanja otpornih mostova

4. UMJERAVANJE TERMOMETARA

Kako bi postigli da ispitivanje karakteristika izotermalne komore bude što pouzdanije prethodno je bilo potrebno umjeriti 10 termometara koji će se koristiti za vrijeme ispitivanja. Rezultatima umjeravanja termometara, dobiveni su podaci o odstupanju svakog termometra što je uzeto u obzir prilikom ispitivanja komore. Umjeravanje termometara vršili smo u kupki manjeg volumena, proizvođača Heto Calibration (LPM ime: TEKUP11) čije smo karakteristike na temelju ispitivanja i iskustva smatrali pouzdanima i provjerenima. Kako bi maksimalno smanjili nesigurnost zbog postojanja gradijenata i zbog temperaturne nestabilnosti kupke, termometre smo smjestili u izotermalni blok prikazan na slici 11.



Slika 7. Izotermalni blok za termostatirane kupke

Umjeravanje termometara radili smo u rasponu radnih temperatura od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperature i razlike pojedinih temperatura u rasponu odabrane su kako bi bile što vjerodostojnije za kasnije ispitivanje izotermalne komore. Temperaturu postignutu u kupki odredili smo s jednim etalonskim termometrom, a pri toj temperaturi očitali smo otpore ostalih devet umjeravanih termometara.

Referentne temperature i očitani otpori pojedinih termometara prikazani su u tablici 6. Podaci u tablici su prosječne vrijednosti temeljene na dužem periodu ispitivanja (cca 30 minuta za pojedinu točku).



slika 8. Termometri uronjeni u izotermalni blok



slika 9. Prikaz kupke, izotermalnog bloka i uronjenih termometara

4.1. Rezultati umjeravanja

Oznaka termometra Stand. PT100-385	CH0	CH1	CH2	CH3	CH4
Temperatura, °C	Otpor, Ω				
-9,986	96,123	96,074	96,107	96,088	96,089
-0,00367	100,031	99,995	100,028	100,009	99,998
10,2009	104,012	103,988	104,022	104,004	103,982
23,0657	109,014	109,002	109, 036	109,018	108,986
29,9037	111,665	111,659	111,694	111,676	111,638
49,8684	119,371	119,377	119,399	119,398	119,349
59,8928	123,222	123,23	123,259	123,239	123,202
Oznaka termometra	CH5	CH6	CH7	CH9	
Temperatura, °C	Otpor, Ω				
-9,986	96,089	96,077	96,080	96,0796	
-0,00367	100,010	99,984	99,999	99,998	
10,2009	104,004	103,965	103,992	103,99	
23,0657	109,014	108,966	109,002	109	
29,9037	111,671	111,616	111,655	111,656	
49,8684	119,384	119,321	119,331	119,373	
59,8928	123,174	123,171	123,18	123,227	

Tablica 7. Ovisnost otpora pojedinog termometra o referentnoj temperaturi

Ovisno o izmjerenim otporima termometara na poznatim referentnim temperaturama moguće je metodom najmanjih kvadrata odrediti karakteristike termometara i prikazati ih jednadžbom gdje je otpor funkcija temperature i obrnuto. Pomoću dobivene jednadžbe za bilo koji očitani otpor termometra možemo saznati njegovu trenutnu temperaturu.

4.2. Izračun koeficijenata

Odnos temperature i otpora za platinske otporničke termometre, funkcijski se obično izražava Callendar-Van Dusen jednadžbom koja aproksimira točke dobivene mjerenjem, a služi i kao interpolacijski polinom između diskretnih točaka:

$$R(T) = R_0 * [1 + A * T + B * T^2 + C * (T - 100) * T^3]$$

gdje je:

R_0 – otpor termometra na temperaturi 0 °C

T – temperatura termometra

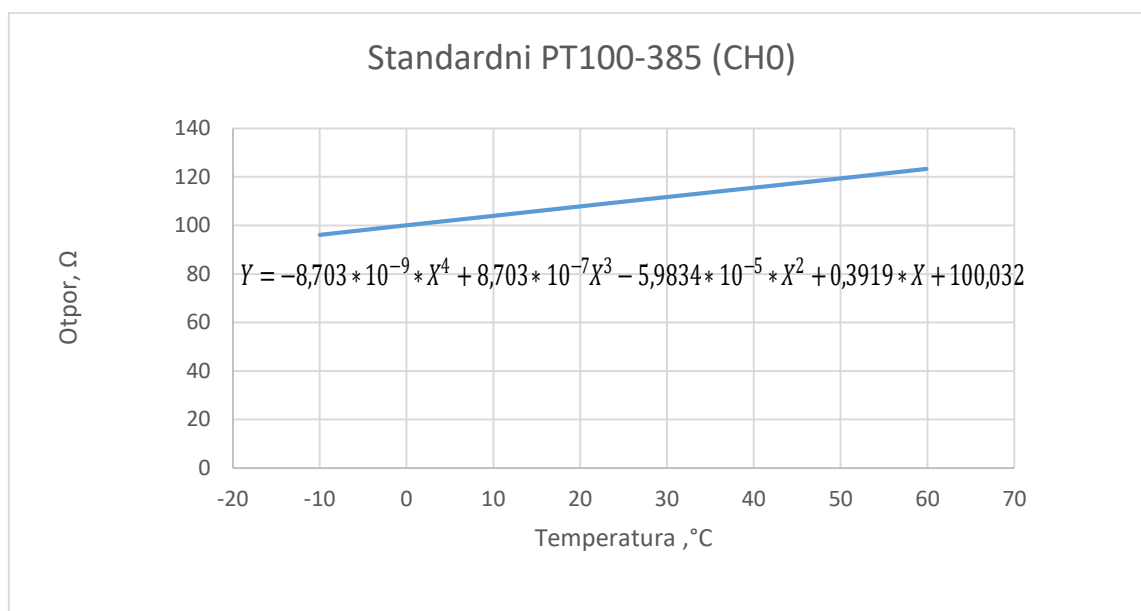
A, B, C, D – individualni koeficijenti termometra

Vrijednosti koeficijenata za pojedini termometar određene su metodom najmanjih kvadrata, upotrebom računalnog programa razvijenog u Laboratoriju za procesna mjerenja.

Izračunate vrijednosti otpora R_0 te koeficijenata A, B i C prikazane su u tablici 7.

Termometar	Koeficijenti			
	R_0	A	B	C
TE0 (CH0)	100,032	$3,906525 * 10^{-3}$	$-5,98147 * 10^{-7}$	$-8,7 * 10^{-11}$
TE1 (CH1)	99,9962	$3,920809 * 10^{-3}$	$-6,90062 * 10^{-7}$	$1,5 * 10^{-11}$
TE2 (CH2)	100,029	$3,922989 * 10^{-3}$	$-7,96234 * 10^{-7}$	$-5,7 * 10^{-11}$
TE3 (CH3)	100,011	$3,920004 * 10^{-3}$	$-6,57992 * 10^{-7}$	$4,5 * 10^{-10}$
TE4 (CH4)	99,9998	$3,909622 * 10^{-3}$	$-5,95229 * 10^{-7}$	$-8,4 * 10^{-11}$
TE5 (CH5)	100,012	$3,919378 * 10^{-3}$	$-7,0653 * 10^{-7}$	$2 * 10^{-9}$
TE6 (CH6)	99,9855	$3,908071 * 10^{-3}$	$-6,0651 * 10^{-7}$	$-3,1 * 10^{-11}$
TE7 (CH7)	99,9994	$3,927052 * 10^{-3}$	$-1,0119 * 10^{-6}$	$-2,8 * 10^{-10}$
TE8 (CH8)	100	$3,91 * 10^{-3}$	$-5,78 * 10^{-7}$	$-4,18 * 10^{-12}$
TE9 (CH9)	99,9995	$3,917898 * 10^{-3}$	$-6,62886 * 10^{-7}$	$-9,7 * 10^{-11}$

Tablica 8. Vrijednosti koeficijenata R_0 , A, B i C



Slika 10. Grafički prikaz funkcije za Standardni PT100-385 termometar spojen na kanalu CH0

4.3. Procjena nesigurnosti umjeravanja termometara

Mjerna nesigurnost umjeravanja termometara određena je upotrebom budžeta nesigurnosti prikazanog u tablici 9. Pojedinačne komponente nesigurnosti odabrane su za najgori mogući slučaj. Iz ovog razloga, u nastavku rada za sve će se termometre u svim temperaturnim točkama usvojiti proširena nesigurnost umjeravanja od 85 mK (izraženo na razini pouzdanosti 95 %).

Nesigurnost određivanja temp. zone kontrolirane temperature						
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena	Nesigurnost	Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitavanje etalona	-9.9860 °C	0.0007 °C	normalna (1 σ)	1.0 [-]	0.7 mK
B	Umjeravanje etalona	0.00 °C	0.0050 °C	normalna (2 σ)	1.0 [-]	2.5 mK
	Drift etalona	0.00 °C	0.0200 °C	pravokutna	1.0 [-]	11.5 mK
	Umjeravanje mosta	0.00 m Ω	0.12 m Ω	normalna (2 σ)	10.0 °C/ Ω @t _S	0.6 mK
	Rezolucija mosta	0.00 m Ω	0.10 m Ω	pravokutna	10.0 °C/ Ω @t _S	0.3 mK
	Gradijenti	0.00 °C	0.0300 °C	pravokutna	1.0 [-]	17.3 mK
A&B	DUT temperature	-9.9860 °C	Standardna nesigurnost (1 σ)			0.0210 °C

Nesigurnost objekta umjeravanj t _{cal} : -9.9860 °C						
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena	Nesigurnost	Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitavanje DUC-a	100.03805 Ω	0.00882 Ω	normalna (1 σ)	1.0 [-]	8.82 m Ω
B	Samozagrijanje	0.00 °C	0.0200 °C	pravokutna	0.385 Ω /°C@t _{cal}	4.45 m Ω
	Dubina uranjanja	0.00 °C	0.0050 °C	pravokutna	0.385 Ω /°C@t _{cal}	1.11 m Ω
	Umjeravanje mosta	0.00 m Ω	0.12 m Ω	normalna (2 σ)	1.0 [-]	0.06 m Ω
	Rezolucija mosta	0.00 m Ω	0.10 m Ω	pravokutna	1.0 [-]	0.03 m Ω
	Utjecaj zonek.t.	0.00 °C	0.0210 °C	normalna (1 σ)	0.385 Ω /°C@t _{cal}	8.08 m Ω
A&B	DUT Resistance	100.0381 Ω	Uncertainty (1 σ)			12.8100 m Ω 0.0333 °C
C	Interpolacija	0.00 m Ω	17.000 m Ω	pravokutna	1.00 [-]	9.81 m Ω
ABC	otpor DUT -a	100.0381 Ω	Nesigurnost (1 σ , 68 %)			16.1378 m Ω 0.0419 °C
			Nesigurnost (2 σ , 95 %)			32.2756 m Ω 0.0838 °C

Tablica 9. Nesigurnost određivanja temperature zone kontrolirane temperature

5. METODA ISPITIVANJA: ISPITIVANJE IZOTERMALNE KOMORE KORIŠTENJEM UMJERENIH TERMOMETARA

Korištena metoda prilikom izrade ovog završnog rada temelji se na uputi: Umjeravanje klimatskih i termostatskih komora (engl. *Calibration of climatic and thermostated chambers*).

Metoda je prilagođena potrebama našeg ispitivanja, a svrha je ispitivanje homogenosti, stalnosti temperature i dinamike zagrijavanja izotermalne komore.

Ispitivanje prema ovoj metodi se odnosi na korisni volumen omeđen mjernim lokacijama u nenapunjenoj komori. O ovoj metodi vrijede pravila o minimalnom broju mjernih lokacija. Ispitivanje prema ovoj metodi pokriva:

- određivanje korekcije pokazivanja komore, tj. razliku između referentne mjerne lokacije i pokazivanja komore,
- određivanje prostorne nehomogenosti u praznom korisnom prostoru,
- određivanje vremenske nestabilnosti u praznom korisnom volumenu,
- određivanje utjecaja zračenja (samo za mjerenje temperature),
- određivanje utjecaja punjenja usporedbom mjerenja u mjernoj lokaciji napunjenog i nenapunjenog korisnog prostora, na zahtjev korisnika.

5.1. Temperature ispitivanja

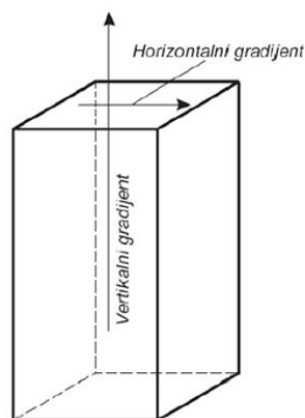
Prilikom ispitivanja važno je unaprijed odabrati temperature ispitivanja koje će najbolje opisati karakteristike ispitivane komore. Kako je zadan raspon temperatura umjeravanja komore od +10 °C do +60 °C, radi veće pouzdanosti podataka odabran je veći broj mjerenja. Točke smo jednoliko rasporedili unutar granica temperature radnog područja, a temperature ispitivanja odabrane su kako slijedi:

- 1) 10 °C
- 2) 30 °C
- 3) 60 °C

Ispitivanja su provedena na svakoj od odabranih točaka u trajanju od najmanje 45 minuta kako bismo bili sigurni da su obuhvaćene oscilacije temperature karakteristične za ispitivanu komoru.

5.2. Temperaturni gradijenti

Temperaturni gradijenti predstavljaju razliku temperature u raznim prostornim točkama unutar radnog volumena komore. Vektor koji je okomit na izotermnu plohu zove se temperaturni gradijent, s pozitivnim predznakom u smjeru povećanja temperature predstavljajući tako povećanje temperature u smjeru normale na izotermnu plohu.



Slika 11. Prikaz temperaturnih gradijenata

Numerički izraženo glasi:

$$\text{grad } \vartheta = \vec{n}_0 * \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta \vartheta}{\Delta n} = \vec{n}_0 * \frac{\partial \vartheta}{\partial n}$$

n_0 – jedinični vektor okomit na izotermnu plohu i pozitivno je definiran u smjeru povećanja temperature

$\frac{\partial \vartheta}{\partial n}$ – skalarna veličina temperaturnog gradijenta izražena u K/m.

Temperaturni gradijenti mogu biti vertikalni i horizontalni.

5.3. Zona umjeravanja

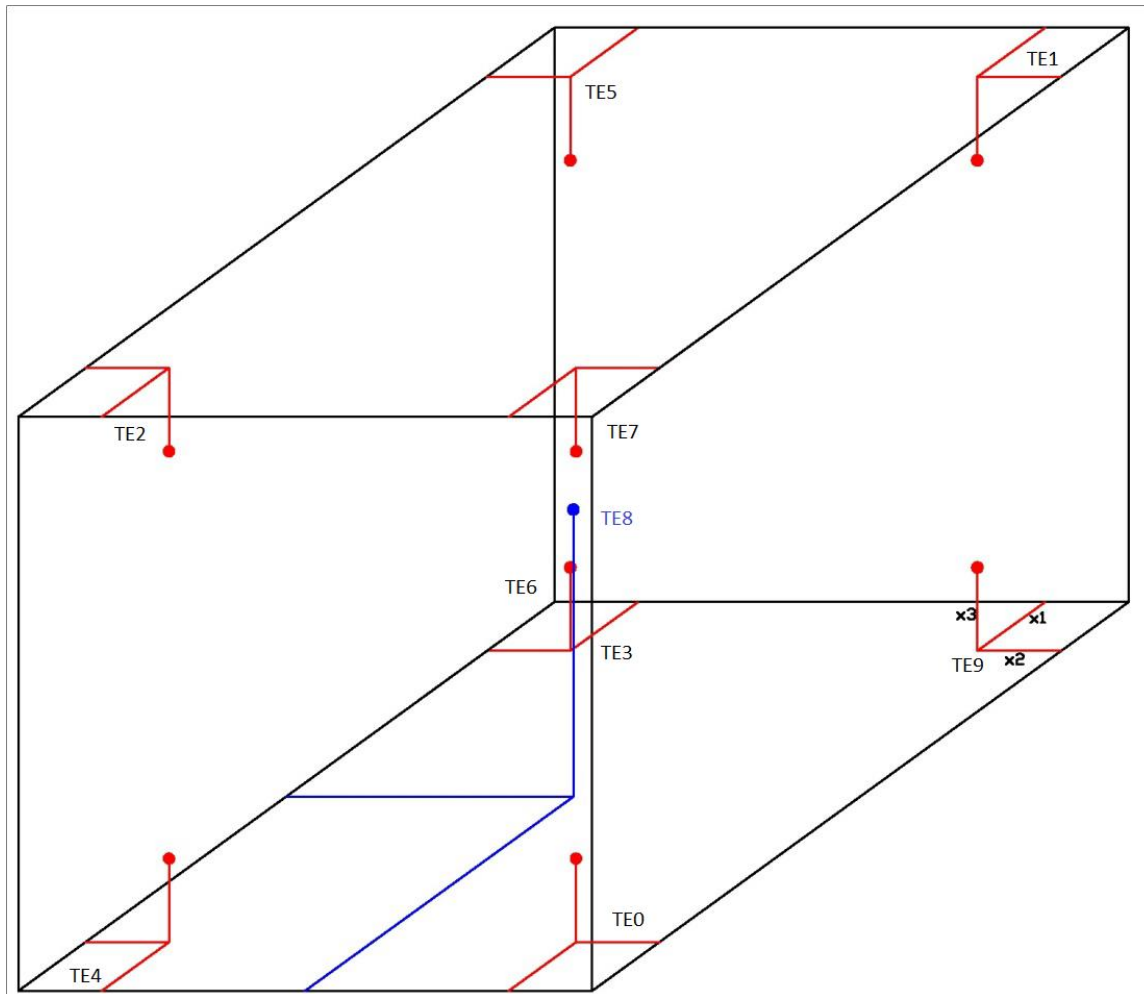
Zona umjeravanja je neko odabrano radno područje unutar volumena komore ispunjenog radnim medijem, koji je u ovom slučaju bio zrak. Zonu definira prvenstveno razmještaj termometara za vrijeme umjeravanja u horizontalnoj ravnini kupke i po visini same zone u odnosu na dno kupke. Odabir položaja termometara unutar zone umjeravanja, kao i mnoge ranije spomenute pretpostavke, temelji se na iskustvu mjeritelja i poznavanju opreme kojom raspolaže. Unutar zone umjeravanja potrebno je umjeriti 10 termometara.

5.4. Prostorna nehomogenost temperature

Prostorna nehomogenost se određuje kao maksimalno odstupanje temperature mjernih lokacija u vrhovima ili na zidu u odnosu na referentnu mjernu lokaciju. Prostorna nehomogenost se mora odrediti za sve temperature ispitivanja. Određuje se samo kod ispitivanja prema metodi A i metodi B.

Potrebno je definirati način pozicioniranja termometara unutar radnog volumena komore, kako bi se osigurala zona umjeravanja. Unutar komore termometre smo vezali na pozicije uz pomoć žice, te tako osigurali njihov položaj.

Ukupno smo koristili devet PT100-385 termometara i etalonski Hart Scientific termometar. Etalonski termometar nalazi se u samoj sredini komore, a neposredno uz njega nalazi se jedan umjereni termometar dok se ostalih osam umjerenih termometara rasporedilo po kutovima komore. Isti raspored termometara ostao je prilikom mjerenja na svim odabranim temperaturama.

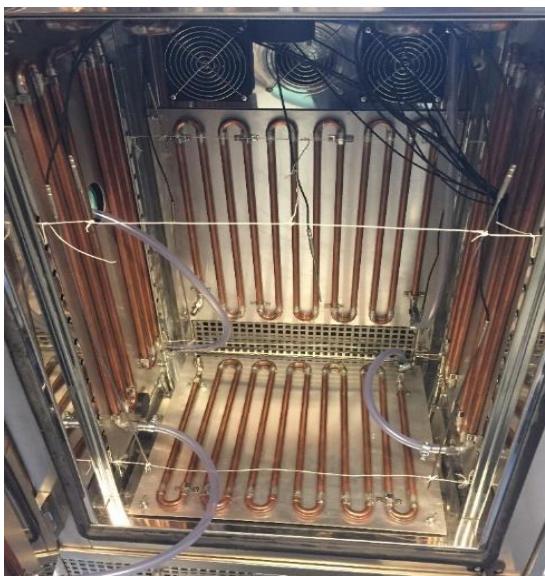


Slika 12. Shema razmještaja termometara po radnom volumenu komore

Doprinos mjernoj nesigurnosti zbog horizontalnih gradijenta izračunava se pomoću jednadžbe:

$$u_{hor} = \frac{\max(\vartheta_i - \vartheta_j)}{\sqrt{3}}; \quad i, j = 1 \text{ do } n$$

gdje n predstavlja broj termometra, a ϑ_i i ϑ_j temperature termometara. Brojnik gore navedene jednadžbe predstavlja poluinterval pravokutne razdiobe i označava se s a . Gradijent se prema tome računa uzimajući u obzir najveću temperaturnu razliku dvaju termometara postavljenih u istoj ravnini. Izračun je potrebno ponoviti u svim ispitivanim ravninama i kao konačan rezultat iskazati najveću dobivenu vrijednost.



Slika 13. Prikaz razmještaja termometara po radnom volumenu komore

Doprinos mjernoj nesigurnosti vertikalnog gradijenta također je određen maksimalnom razlikom temperature referentnog i pomičnih termometara, dok je referentni u početnom položaju, a ostali na različitim visinama. Moguće ga je izraziti jednadžbom:

$$u_{vert} = \frac{\max(\vartheta_{ref} - \vartheta_i)}{\sqrt{3}};$$

Ukupan doprinos homogenosti mjernoj nesigurnosti temperature izražava se jednadžbom:

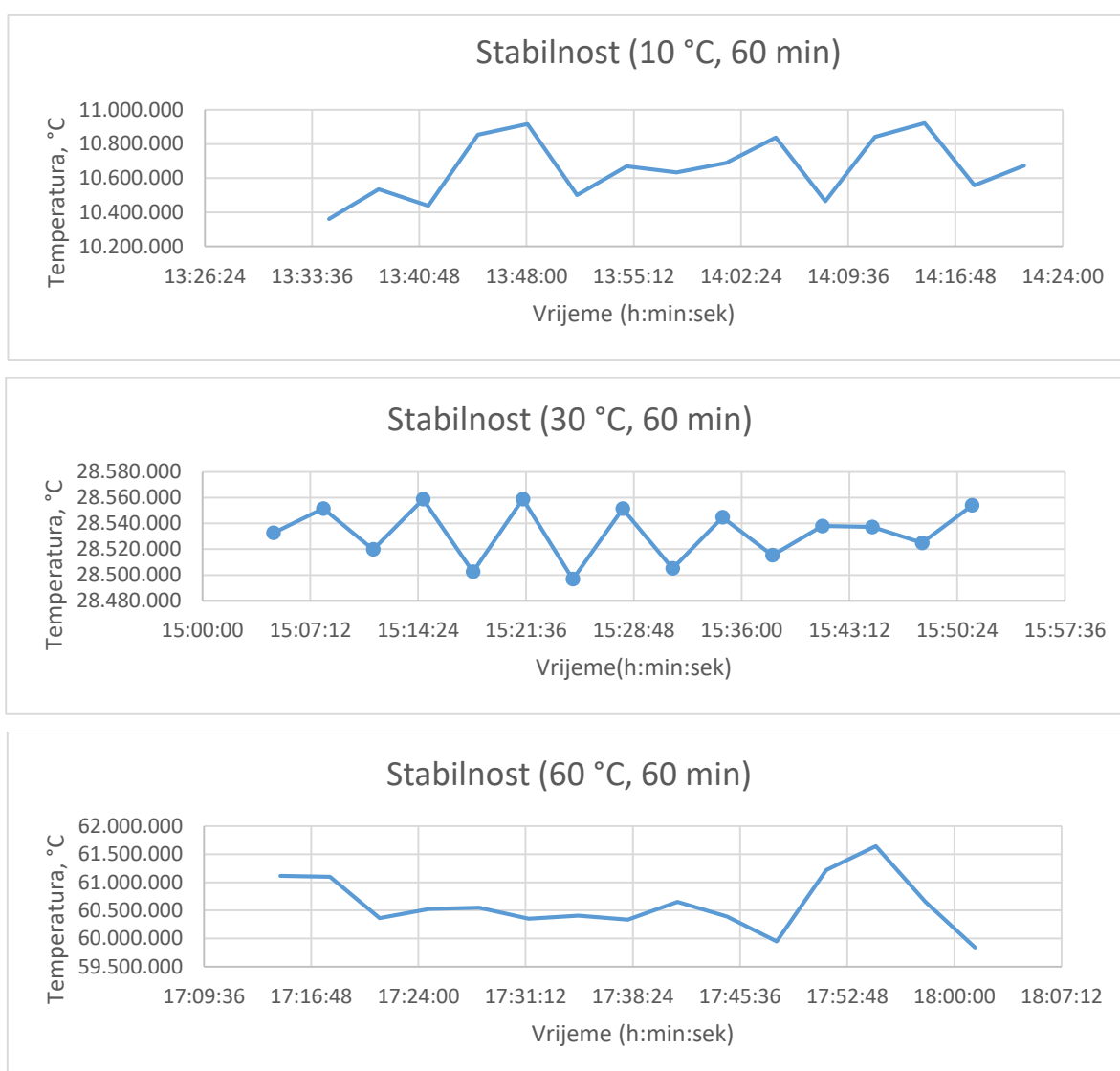
$$u_{hom} = \sqrt{u_{hor}^2 + u_{vert}^2}$$

5.5. Ispitivanje vremenske nestabilnosti

Vremenska nestabilnost temperature i relativne vlažnosti zraka određuje se bilježenjem vremenske varijacije temperature ili relativne vlažnosti tijekom razdoblja od 30-45 minuta, a nakon što se uspostave stabilni uvjeti u komori. Stabilni uvjeti nastupaju kada su sistematичne varijacije temperature i relativne vlažnosti nemjerljive. Za komore bez recirkulacije zraka, mjerenja je moguće započeti tek 30 minuta nakon dostizanja stabilnog stanja. Za određivanje vremenske nestabilnosti, potrebno je izmjeriti najmanje 30 mjernih vrijednosti tijekom razdoblja od 30 minuta uz manje ili više jednake intervale između mjerenja. Mjerenja se moraju provesti barem za sredinu korisnog volumena ili referentnu mjernu lokaciju, za svaku ispitnu temperaturu i relativnu vlažnost. Vremenska nestabilnost mora se odrediti kod svih metoda.

5.6. Stabilnost temperature

Stabilnost temperature medija komore sljedeća je važna karakteristika. Stabilnost temperature vrlo je bitna karakteristika zona kontrolirane temperature, a govori nam o mjernoj nesigurnosti zone zbog temperaturnih oscilacija. Ovisi o vrsti regulacijske opreme i protoku medija kroz radni volumen komore. S obzirom na to da se mjerenja u komori obično provode u periodu od nekoliko minuta, za određivanje stabilnosti komore temperaturne oscilacije je dovoljno pratiti u periodu od 30 minuta. Za ocjenu vremenske stabilnosti komore, u obzir se uzimaju samo oscilacije temperature referentnog termometra. Postupak se provodi na svakoj testnoj temperaturi a rezultate mjerenja moguće je prikazati u tabličnom i grafičkom obliku. Kao primjer na slikama je prikazana vremenska promjena temperature referentnog termometra.



Slika 14. Temperaturni tok referalnog termometra na zadanim ispitnim temperaturama

Najveće odstupanje temperature izmjereno referentnim termometrom koristi se za određivanje stalnosti temperature.

Kao referentna vrijednost za određivanje kratkotrajne stabilnosti uzima se najnepovoljniji slučaj, u kojem su oscilacije temperature najveće a nesigurnost se potom izračunava formulom:

$$u_{stab} = \frac{\max(\vartheta_{ref,max} - \vartheta_{ref,min})}{\sqrt{3}}$$

Sveukupni doprinos koji se pripisuje gradijentu kao i stabilnost kupke izračunava se sljedećom jednačinom:

$$u_{zone} = \sqrt{u_{hom}^2 + u_{stab}^2}$$

5.7. Dinamika zagrijanja/hlađenja

Tijekom mjerenja dinamike hlađenja komora treba biti u istim uvjetima kao kada se vrši umjeravanje. Ako komora ima mogućnost prisilne cirkulacije medija, ona treba biti uključena, te ako je intenzitet cirkulacije podešiv, treba biti podešen na onakvu cirkulaciju koja se koristi tijekom umjeravanja. Navedene postavke (ako postoje) trebaju biti evidentirane u završnom ispitnom izvještaju.

Postupak:

- a) Za mjerenje dinamike hlađenja odabire se referentna pozicija.
- b) Ispitni termometar se pozicionira na referentnu poziciju
- c) Na temperaturnom regulatoru komore odabire se željena temperatura. Uključuju se hladila i dolazi do promjene temperature koja se bilježi u jednakim vremenskim intervalima i to od početne pa sve do željene temperature.
- d) Ovim postupkom dobivamo skup od i temperatura izmjerenih u k intervalima. Dinamika temperaturne promjene može biti prikazana grafički, u dijagramu temperatura-vrijeme. Iz takvog se dijagrama kasnije mogu očitati detaljni podaci.

Dinamika promjene temperature je pomoćna vrijednost, a može biti izmjerena uz pomoć iste mjerne opreme koju smo koristili ranije (ako ima mogućnost praćenja i bilježenja).

6. Uputa za ispitivanje termostatisanih komora

6.1. Osnovni podaci o uputi

Svrha: Ispitivanje termostatisanih komora.

Opseg: • Određivanje odstupanja pokazivanja komore ili razlika između pokazivanja komore i mjerenih vrijednosti u referentnoj mjernoj lokaciji

- Određivanje prostorne nehomogenosti u korisnom volumenu komore
- Određivanje vremenske nestabilnosti u korisnom volumenu komore
- Određivanje utjecaja zračenja (samo za mjerenje temperature zraka).

6.2. Potrebna mjerna oprema

- Višekanalni digitalni termometar prikladan za korištenje s termoparovima ili PRT sondama, sposoban za mjerenje najmanje 10 kanala.
- Etalonski termometar
- 9 umjerenih termometara;
- ASL 158 (EOMOS03/01 - multipleksor)
- ASL 148 (EOMOS03/02 – komunikacijska i upravljačka jedinica multipleksora)
- ASL F700 (EOMOS03/03 – termometrijski otpornički most)
- Ostala pomoćna oprema.

6.3. Uvjeti mjerenja

Kada postoji raspon temperatura ispitivanja, ispitivanje komore mora se provesti na sljedećim temperaturama i relativnim vlažnostima:

- Donjoj granici radnog područja
- Sredini radnog područja
- Gornjoj granici radnog područja.

Moguće je izabrati i dodatne temperature i relativne vlažnosti unutar radnoga područja kako bi se dobio bolji uvid u ponašanje komore. Ako je područje rada komore malo ili ako se komora koristi samo za određenu temperaturu, moguće je ispitivanje provesti na dvije ili samo jednoj temperaturi.

6.4. Priprema mjerenja

Kako bi pripremio mjerenja, radnik laboratorija mora:

- Postaviti uređaje za mjerenje uvjeta u prostoru u okolinu ispitivane komore i čekati najmanje 15 minuta da se mjerenja stabiliziraju.
- Pregledati termostatiranu komoru koja se ispituje i odlučiti može li se ispitivanje sigurno provesti.
- Ispuniti prvi dio izvješća o mjerenju koji se tiče podataka o opremi za mjerenje koja utječe na mjernu nesigurnost.
- Ispuniti podatke o komori, detaljno opisati i nacrtati prostorni raspored korisnog prostora komore i prostornih točaka u kojima su odabrane mjerne lokacije prema DKD-R 5-7
- Za termostatirane komore s korisnim volumenom manjim od 2000 litara, točka 1 (referentna mjerna lokacija) u središtu komore, točke 2-9 u svih osam kutova komore na udaljenosti $L/10$ od susjednog zida komore, gdje je L razmak između susjednog zida i njegovog nasuprotnog zida, razmak između zida i mjerne lokacije ne smije nikada biti manji od 5 cm.
- Za termostatirane komore s korisnim volumenom jednakim ili većim od 2000 litara, točka 1 (referentna mjerna lokacija) u središtu komore, točke 2-n tako postavljene da tvore mrežu kvadra s razmakom od najviše 1 m između dvije točke. Razmak između zida i mjerne lokacije ne smije nikada biti manji od 5 cm.
- Pripremiti digitalni višekanalni termometar za mjerenje i postaviti termometre u mjerne pozicije.
- Provjeriti odgovaraju li koeficijenti u postavkama višekanalnog digitalnog termometra termometrima postavljenim u mjernim lokacijama.
- Postaviti vrhove 9 termometara u predviđene mjerne lokacije u prostoru komore i etalonski termometar u središte radnog volumena komore
- Zatvoriti termostatiranu komoru po završetku pripreme mjerenja.

7. Slijed testiranja

Laborant postavlja na komori temperaturu na ispitnu vrijednost i zapisuje vrijeme početka mjerenja.

7.1. Mjerenje prostorne nehomogenosti i utjecaja zračenja

Za mjerenje prostorne homogenosti temperature i utjecaja zračenja koristi se 10 PRT sonde od kojih jedna ima zaštitu od zračenja i postavlja se blizu termometra u referentnoj mjernoj lokaciji. Višekanalni digitalni termometar očitava i zapisuje vrijednosti temperature sa svih termometara. Mjerenja se provode u nenapunjenom stanju komore. Deset termometara mjeri istovremeno. Mjerenja mogu započeti nakon što se postigne stabilno stanje (temperatura u svakoj mjernoj točki variraju manje od očekivane mjerne nesigurnosti). Višekanalni digitalni termometar se programira da zapisuje očitane temperature u svakom trenutku, najmanju vrijednost temperature $t_{i,min}$, najvišu vrijednost temperature $t_{i,max}$ i srednju vrijednost temperature u svakoj mjernoj lokaciji. Mjerenje traje 15 minuta i tijekom toga perioda očitavanje se mora raditi svakih 60 sekundi. Kada je mjerenje završeno, vrijednosti se zapisuju u radni list.

7.2. Mjerenje vremenske nestabilnosti

Za mjerenje vremenske nestabilnosti temperature u komori koristi se 9 PRT sonde i jedan etalonski termometar. Višekanalni termometar mjeri i zapisuje vrijednosti temperatura u svim mjernim lokacijama. Mjerenja se provode u nenapunjenom stanju komore. Mjerenja mogu započeti nakon što se postigne stabilno stanje (temperatura u svakoj mjernoj točki variraju manje od očekivane mjerne nesigurnosti). Višekanalni digitalni termometar se programira da zapisuje očitane temperature u svakome trenutku i srednju vrijednost temperature u svakoj mjernoj lokaciji. Mjerenja traju 30 minuta, a očitavanja vrijednost temperature i relativne vlažnosti tijekom tog perioda moraju se raditi svakih 60 sekundi. Kada je mjerenje završeno, vrijednosti se zapisuju u radni list.

8. Obrada rezultata mjerenja

8.1. Prostorna nehomogenost

Prostorna nehomogenost određena je kao najveće odstupanje temperature u jednoj od mjernih lokacija od temperature u referentnoj mjernoj lokaciji.

8.1.1. *Prostorna nehomogenost temperature*

Srednje vrijednosti mjerenih temperatura u vremenu na i -toj mjernoj lokaciji definirane su jednadžbom:

$$t_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K t_{i,j} \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

Najveći pozitivni i najveći negativni vremenski gradijent temperature u svim mjernim točkama je dan izrazom:

$$\Delta t_{RP+} = \max[(t_i - t_{RP}), (i = 1, 2, \dots, N)]$$

$$\Delta t_{RP-} = \max[(t_{RP} - t_i), (i = 1, 2, \dots, N)]$$

Prostorna nehomogenost temperature:

$$\delta t_{inhom} = \max[\Delta t_{RP+}, \Delta t_{RP-}]$$

Mjerna nesigurnost zbog prostorne nehomogenosti temperature:

$$u(\delta t_{inhom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \delta t_{inhom}$$

Najveća prostorna nehomogenost temperature preko cijele komore:

$$\Delta t_{RP} = \Delta t_{RP+} + \Delta t_{RP-}$$

8.2. Vremenska nestabilnost

Vremenska nestabilnost se određuje iz snimljenih vremenskih varijacija temperature u jednoj (referentnoj) ili više mjernih lokacija tokom perioda od najmanje 30 minuta, a nakon što se postignu stabilni uvjeti u komori. Najveće odstupanje temperature od srednje vrijednosti snimljenih temperatura definirano je kao vremenska nestabilnost.

8.2.1. Vremenska nestabilnost temperature

Srednje vrijednosti mjerenih temperatura u vremenu na i -toj mjernoj lokaciji su definirane jednadžbom:

$$t_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K t_{i,j} \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

Najveći pozitivni i najveći negativni vremenski gradijent temperature u svim mjernim točkama dan je izrazom:

$$\Delta t_{instab} = \max[(t_i - t_{RP}), (i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, K)]$$

$$\Delta t_{instab} = \max[(t_{RP} - t_i), (i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, K)]$$

Vremenska nestabilnost temperature dana je izrazom:

$$\delta t_{instab} = \max[(\Delta t_{instab+}, \Delta t_{instab-})]$$

Mjerna nesigurnost zbog vremenske nestabilnosti temperature računa se izrazom:

$$u(\delta_{instab}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \delta t_{instab}$$

8.3. Nesigurnost etalonskih mjernih uređaja

8.3.1. Uređaji za mjerenje temperature u radnom volumenu komore

$$\delta t_{std} = \delta t_{cal} + \delta t_{drift} :$$

$t_{i,std} \Delta t_{i,std}$ temperatura mjerena termometrima za pojedinu lokaciju i ($i = 1 \dots N$) Tip A mjerne nesigurnosti koji se određuje kao standardna devijacija srednje vrijednosti više očitavanja svakog upotrebljenog termometra

δt_{cal} : odstupanje termometra utvrđeno umjeravanjem

δt_{drift} : klizanje termometra koje se procjenjuje iz povijesti umjeravanja termometra.

8.4. Vrijednost postavljena na regulatoru temperature ispitivane termostatirane komore

$$\Delta t_{set} = t_{set} - t_{std} + \delta t_{std} + \delta t_{instab} + \delta t_{inhom} + \delta t_{rad} + \delta t_{res}$$

Δt_{set} : odstupanje temperature postavljene na regulatoru komore u odnosu na stvarnu temperaturu u sredini radnog volumena komore

t_{set} : temperature postavljene na regulatoru komore. Mjerna nesigurnost se dobije kao standardna devijacija srednje vrijednosti očitavanja

t_{std} : temperatura izmjerena etalonskim termometrom smještenim u sredini radnog volumena termostatirane komore

δt_{std} : korekcija temperature izmjerene etalonskim termometrom smještenim u sredini radnog volumena termostatirane komore

δt_{instab} : utjecaj nestabilnost temperature mjerene etalonskim termometrom smještenim u sredini radnog volumena termostatirane komore

δt_{inhom} : utjecaj prostornih gradijenata u radnom volumenu komore (u odnosu na temperaturu u središtu tog volumena)

δt_{rad} : utjecaj zračenja na temperaturu izmjerenu etalonskim termometrom smještenim u sredini radnog volumena termostatirane komore

δt_{res} : utjecaj rezolucije regulatora temperature termostatirane komore. Mjerna nesigurnost se izračunava preko pravokutne razdiobe.

8.5. Izračun doprinosa mjernoj nesigurnosti

Doprinos mjernoj nesigurnosti kao i proširena mjerna nesigurnost računaju se pomoću dobivenih mjernih nesigurnosti odstupanja etalona i predmeta umjeravanja (komore) prilikom mjerenja temperature i relativne vlažnosti. Proširena se mjerna nesigurnost temelji na standardnoj mjernoj nesigurnosti koja pomnožena faktorom pokrivanja $k=2$ za normalnu razdiobu odgovara pouzdanosti od približno 95 %.

Standardna mjerna nesigurnost temperature dana je izrazom:

$$U(t)_{k=1} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{instab}^2 + u_{inhom}^2 + u_{rad}^2 + u_{res}^2}$$

Proširena mjerna nesigurnost temperature dana je izrazom:

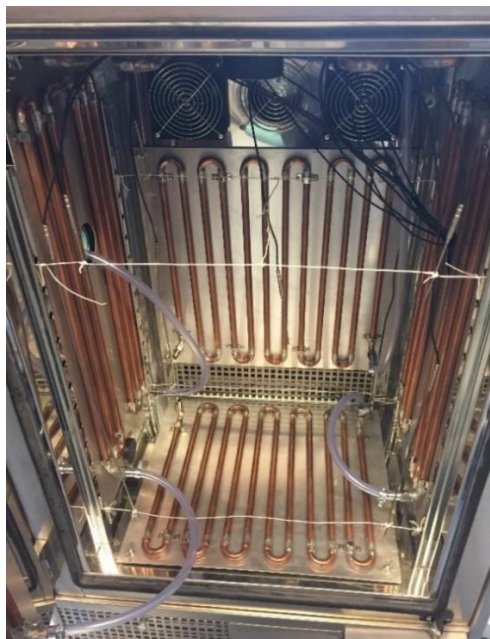
$$U(t)_{k=2} = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{instab}^2 + u_{inhom}^2 + u_{rad}^2 + u_{res}^2}$$

9. Ispitivanje komore u LPM

9.1. Postupak ispitivanja

Postupak ispitivanja komore obuhvatio je određivanje prostornih gradijenata, vremenske stabilnosti temperature i dinamike zagrijanja u korisnom prostoru komore. Jedan termometar, broj 8, smješten je u referentnu mjernu lokaciju, a kraj njega je postavljen i termometar broj 3. Ostalih osam termometara mjerilo je temperature u kutovima komore redom i kako se vidi i na fotografijama s mjerenja:

- Termometar TE0 (CH0) u prednjem desnom donjem kutu komore,
- Termometar TE1 (CH1) u stražnjem desnom gornjem kutu komore,
- Termometar TE2 (CH2) u prednjem lijevom gornjem kutu komore,
- Termometar TE3 (CH3) u samom središtu komore,
- Termometar TE4 (CH4) u prednjem lijevom donjem kutu komore,
- Termometar TE5 (CH5) u stražnjem lijevom gornjem kutu komore,
- Termometar TE6 (CH6) u stražnjem lijevom donjem kutu komore,
- Termometar TE7 (CH7) u prednjem desnom gornjem kutu komore,
- Termometar TE8 (CH8) u samom središtu komore,
- Termometar TE9 (CH9) u stražnjem desnom donjem kutu komore,



Slika 15. Položaj termometara unutar korisnog prostora komore

Za mjerenje temperature preko otpora korišten je digitalni višekanalni termometar koji je podatke preko veze s računalom zapisivao u datoteku. Očitavanje svakog termometra vršilo se svakih 3 minute i 20 sekundi, a ukupno trajanje mjerenja trajalo je 45 minuta nakon postizanja stabilnog stanja u komori. Mjerenje je ukupno provedeno tri puta, za tri različita uvjeta temperature u komori.

9.2. Rezultati ispitivanja

Ispitivani objekt	Izotermalna komora
Datum ispitivanja	16.07.2018. - 27.7.2018.
Radni medij	Zrak
Referentna mjerna lokacija u središtu komore:	$i = 8$
Ostale mjerne lokacije u kutovima komore:	$i = 0, 1, 2, \dots 9$
Utjecaj punjenja na mjernu nesigurnost nije se određivao.	

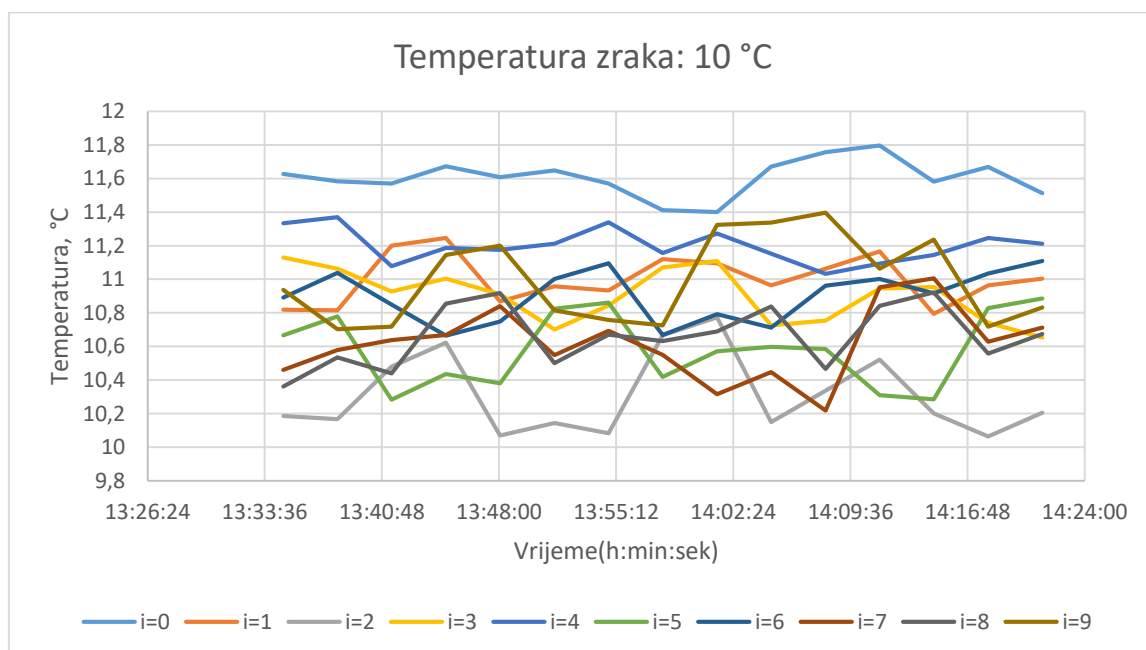
Tablica 10. Prikaz osnovnih podataka o ispitivanju

9.3. Regulator temperature u komori uključen, a izmjenjivači nisu napajani vodom iz kupke

9.3.1. Postavljena temperatura zraka u komori: 10 °C

Postavljena temperatura	10,00 °C				
Vrijeme početka mjerenja	13:34:44				
Vrijeme zavšetka mjerenja	14:21:24				
Očitavanja termometara					
Oznaka mjerene lokacije	t_0	t_1	t_2	$t_{3(\text{Zrač})}$	t_4
Temperatura, °C	11,61	11,00	10,31	10,90	11,20
u_stab, °C	0,028	0,037	0,062	0,041	0,025
Oznaka mjerene lokacije	t_5	t_6	t_7	$t_{8(\text{STD})}$	t_9
Temperatura, °C	10,58	10,90	10,62	10,66	10,99
u_stab, °C	0,056	0,039	0,055	0,047	0,067
t_{\max} , °C	11,61				
t_{\min} , °C	10,31				
$t_{\max} - t_8$, °C	0,95				
$t_8 - t_{\min}$, °C	0,35				
Utjecaj zračenja, $ t_3 - t_8 $, °C	0,242				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,945				

Tablica 10. Prikaz rezultata ispitivanja komore s postavljenom temperaturom zraka u komori na 10 °C.



Slika 16. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 10\text{ °C}$)

Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 10 °C

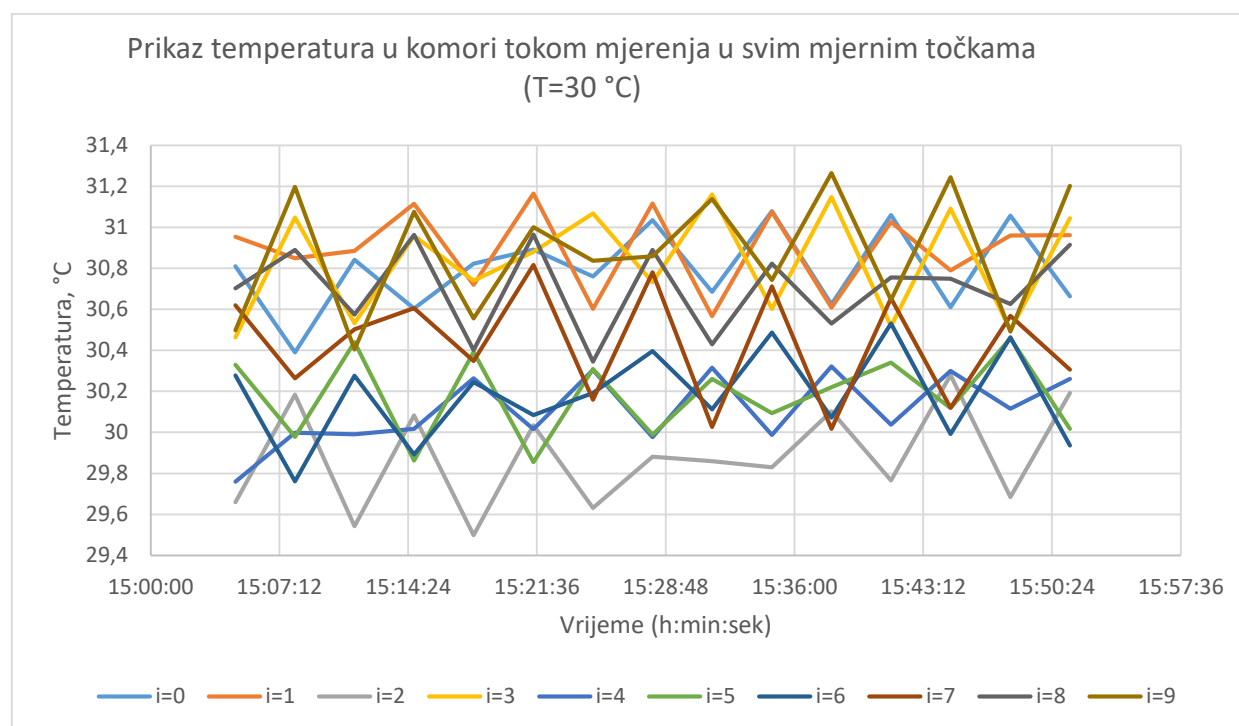
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	10,66	47	Normalna (1σ)	47
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna (2σ)	42,5
δt_{drift}	Klizanje termometara	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	10.00	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		945	Pravokutna	546
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		86,00	Normalna (1σ)	86,00
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		242	Pravokutna	140
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	575	mK			
$U_{k=2} =$	1150	mK			

Tablica 11. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 10 °C

9.3.2. Postavljena temperatura zraka u komori: 30 °C

Postavljena temperatura	30,00 °C				
Vrijeme početka mjerenja	15:04:44				
Vrijeme zavšetka mjerenja	15:51:24				
Očitanja termometara					
Oznaka mjerene lokacije	t_0	t_1	t_2	t_3 (Zrač)	t_4
temperatura	30,80	30,89	29,88	30,83	30,11
u_stab	0,053	0,051	0,065	0,067	0,044
Oznaka mjerene lokacije	t_5	t_6	t_7	$t_{8(STD)}$	t_9
Temperatura, °C	30,18	30,18	30,43	30,70	30,88
u_stab, °C	0,053	0,060	0,071	0,054	0,079
t_{max} , °C	30,89				
t_{min} , °C	29,88				
$t_{max} - t_8$, °C	0,19				
$t_8 - t_{min}$, °C	0,82				
Zračenje= $t_3 - t_8$	0,128				
Temperaturna nehomogenost °C	0,822				

Tablica 12. Prikaz rezultata ispitivanja komore s postavljenom temperaturom zraka u komori na 30 °C



Slika 17. Prikaz temperatura u komori tijekom mjerenja u svim mjernim točkama (T = 30 °C)

Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 30 °C

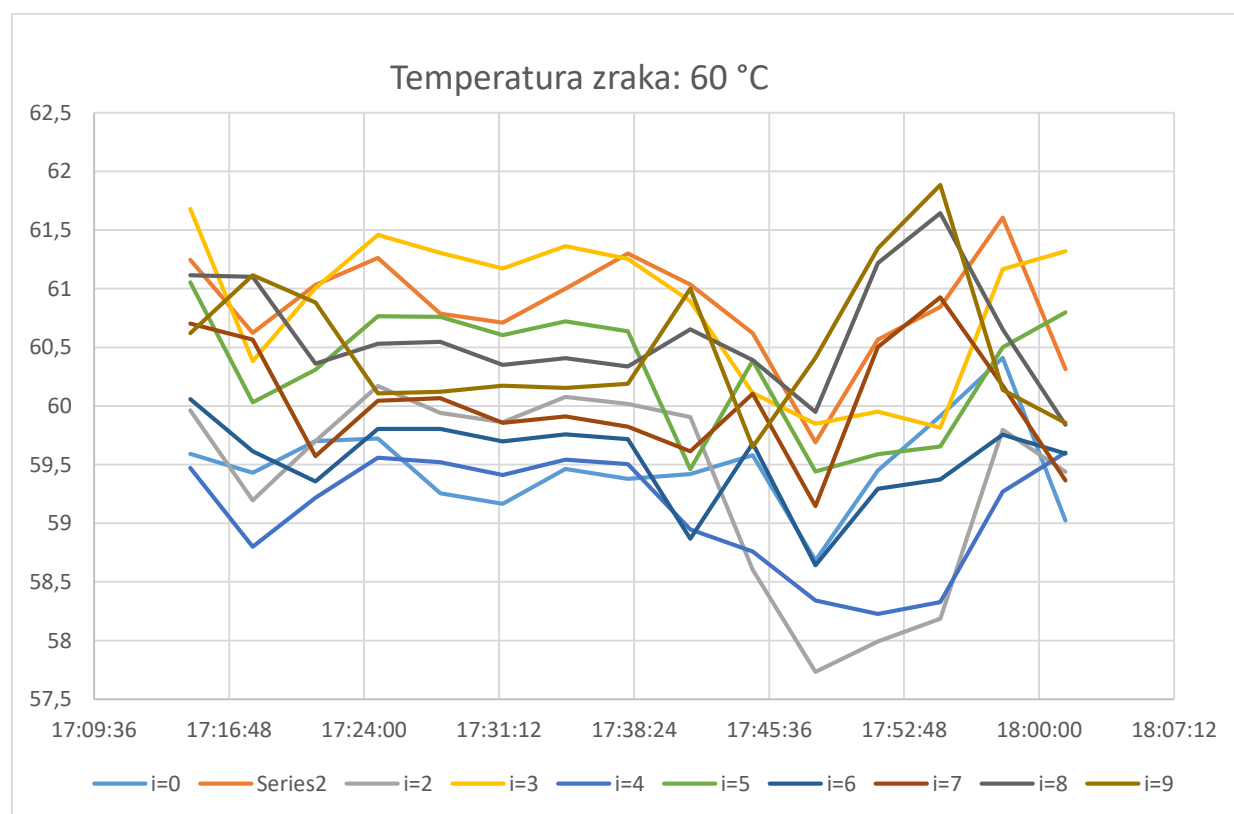
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	30,7	54	Normalna (1σ)	54
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna(2σ)	42.5
δt_{drift}	Klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	30.00	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		822	Pravokutna	475
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		102	Normalna(1σ)	102
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		128	Pravokutna	74
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	498	mK			
$U_{k=2} =$	996	mK			

Tablica 13. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 30 °C

9.3.3. Temperatura zraka: 60 °C

Očitavanja termometara, 60 °C					
Mjerna pozicija	t_0	t_1	t_2	t_3 (Zrač)	t_4
temperatura	59,48	61,30	59,37	60,85	59,10
u_stab	0,102	0,505	0,215	0,166	0,128
Mjerena pozicija	t_5	t_6	t_7	$t_{8(STD)}$	t_9
temperatura	60,31398	59,53444	60,02502	60,60593	60,50964
u_stab	0,140	0,097	0,129	0,125	0,160
$t_{max}, ^\circ C$	61,30				
$t_{min}, ^\circ C$	59,10				
$t_{max}-t_8, ^\circ C$	0,69				
$t_8-t_{min}, ^\circ C$	1,51				
Zračenje= t_3-t_8	0,243				
Temperaturna nehomogenost, °C	1,51				

Tablica 14. Prikaz rezultata ispitivanja komore s postavljenom temperaturom zraka u komori na 60 °C



Slika 18. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama (T = 60 °C)

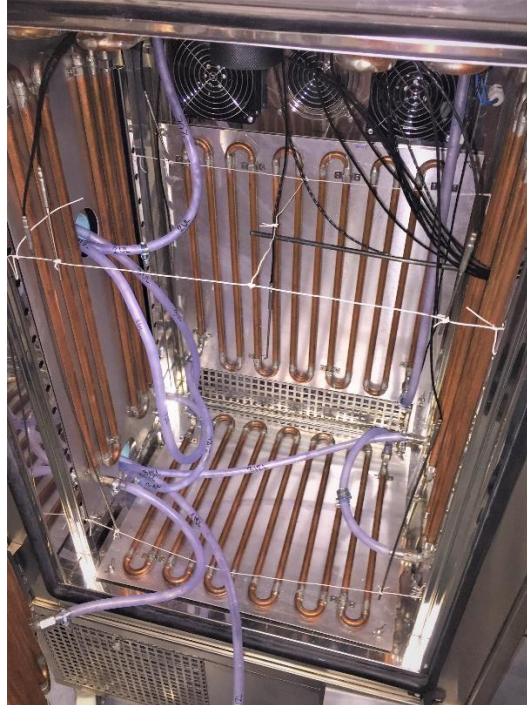
Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 60 °C

Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	60,61	125	Normalna (1σ)	125
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna(2σ)	42.5
δt_{drift}	Klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	60.00	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		1506	Pravokutna	869
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		763	Normalna(1σ)	763
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		243	Pravokutna	140
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	1173	mK			
$U_{k=2} =$	2346	mK			

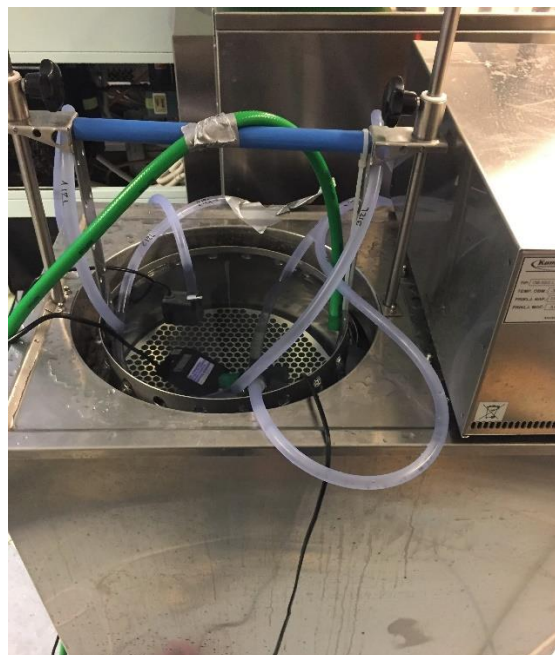
Tablica 15. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka u komori postavljenu na 60 °C

9.4. Regulator temperature u komori uključen, a izmjenjivači napajani vodom iz kupke

U ovom ispitivanju izmjenjivači su napajani vodom iz kupke. U kupki su bile smještene tri pumpe koje su omogućile cirkulaciju vode kroz izmjenjivače unutar komore.



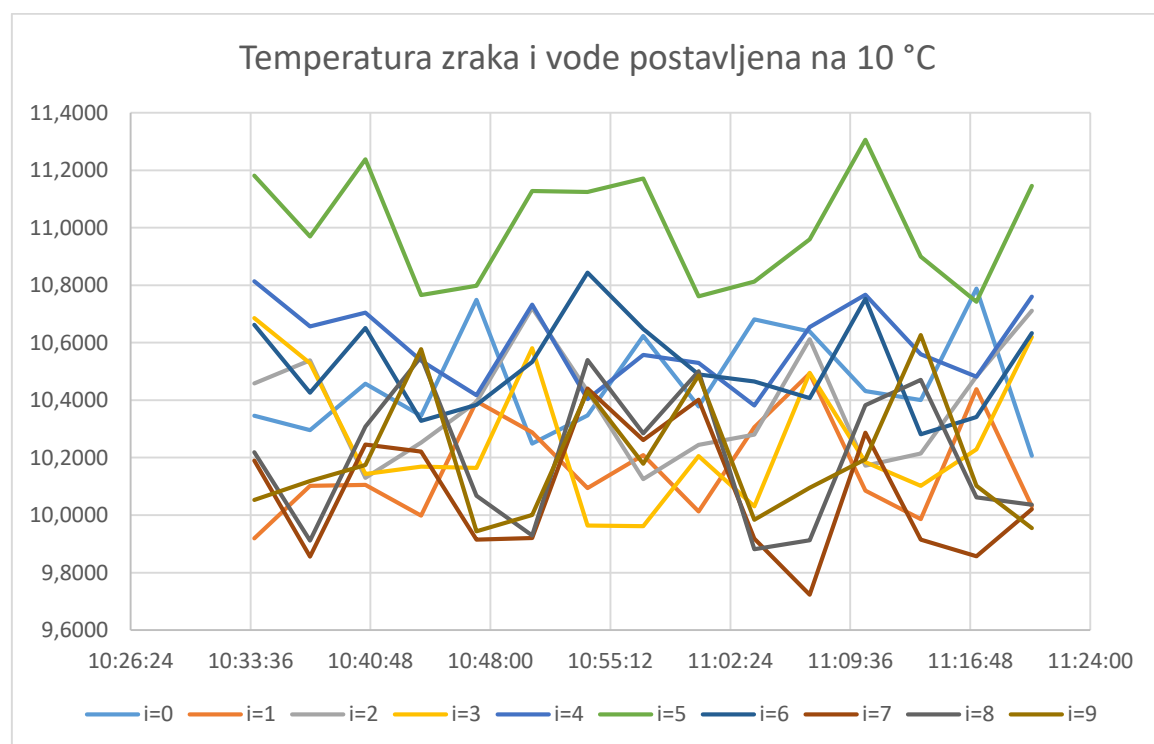
Slika 19. Prikaz izmjenjivača unutar komore napajanih vodom iz kupke



Slika 20. Prikaz kupke i uronjenih pumpi koje su omogućile cirkulaciju vode kroz izmjenjivače

9.4.1. Postavljena temperatura zraka i vode u komori: 10 °C

Postavljena temperatura	10,00 °C				
Vrijeme početka mjerenja	10:33:50				
Vrijeme završetka mjerenja	11:20:30				
Očitavanja termometara					
Oznaka mjerene lokacije	t_0	t_1	t_2	$t_3(\text{Zrač})$	t_4
Temperatura, °C	10,46	10,16	10,38	10,27	10,60
u_stab, °C	0,048	0,046	0,052	0,063	0,036
Oznaka mjerene lokacije	t_5	t_6	t_7	$t_8(\text{STD})$	t_9
Temperatura, °C	11,00	10,52	10,08	10,20	10,19
u_stab, °C	0,050	0,043	0,058	0,064	0,059
t_{\max} , °C	11,00				
t_{\min} , °C	10,08				
$t_{\max} - t_8$, °C	0,80				
$t_8 - t_{\min}$, °C	0,13				
Utjecaj zračenja, $ t_3 - t_8 $, °C	0,067				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,80				

Tablica 16. Prikaz rezultata ispitivanja komore s postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 10 °C**Slika 21. Prikaz temperatura u komori tijekom mjerenja u svim mjernim točkama (T = 10 °C)**

Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 10 °C

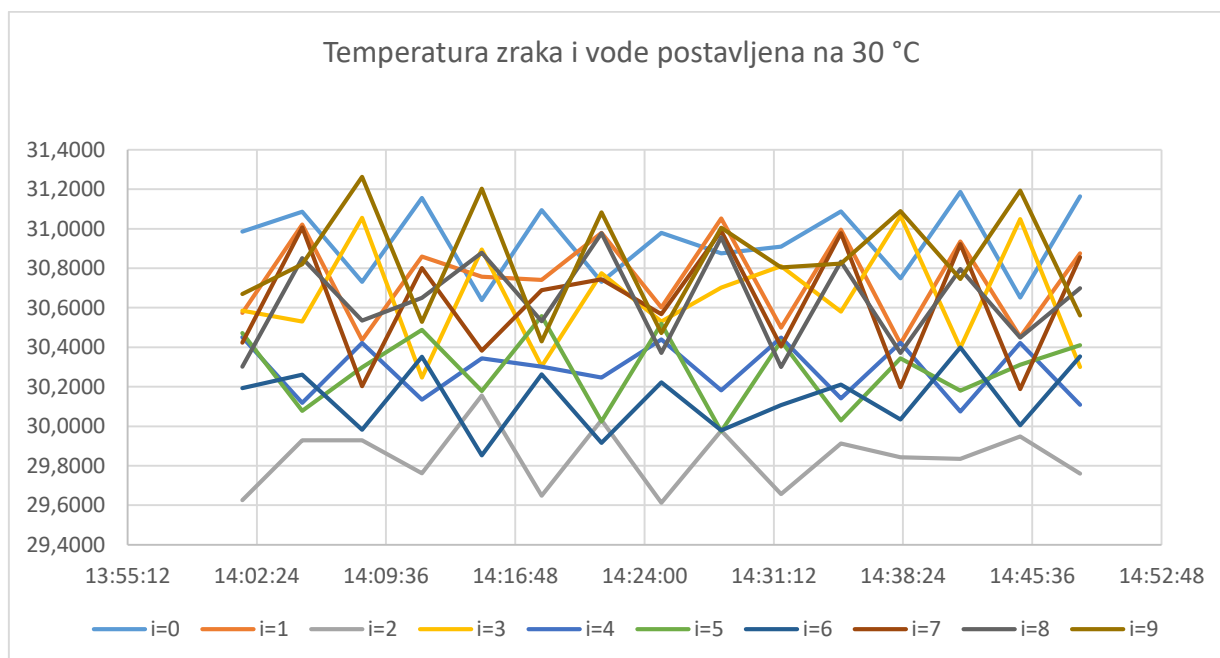
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	10,20	64	Normalna (1σ)	64
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna (2σ)	42,5
δt_{drift}	Klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	10.00	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		796	Pravokutna	460
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		89	Normalna (1σ)	89
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		67	Pravokutna	39
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	478	mK			
$U_{k=2} =$	956	mK			

Tablica 17. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 10 °C

9.4.2. Postavljena temperatura zraka i vode u komori: 30 °C

Postavljena temperatura	30,00 °C				
Vrijeme početka mjerenja	14:01:36				
Vrijeme zavšetka mjerenja	14:48:16				
Očitanja termometara					
Oznaka mjerene lokacije	t_0	t_1	t_2	$t_3(\text{Zrač})$	t_4
Temperatura, °C	30,94	30,75	29,84	30,66	30,28
u_stab, °C	0,050	0,060	0,042	0,073	0,038
Oznaka mjerene lokacije	t_5	t_6	t_7	$t_8(\text{STD})$	t_9
Temperatura, °C	30,29	30,14	30,62	30,63	30,85
u_stab, °C	0,051	0,044	0,062	0,062	0,072
t_{\max} , °C	30,94				
t_{\min} , °C	29,84				
$t_{\max} - t_8$, °C	0,30				
$t_8 - t_{\min}$, °C	0,79				
Utjecaj zračenja, $ t_3 - t_8 $, °C	0,022				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,79				

Tablica 18. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 30 °C.



Slika 22. Prikaz temperatura u komori tijekom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 30\text{ °C}$)

Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 30 °C

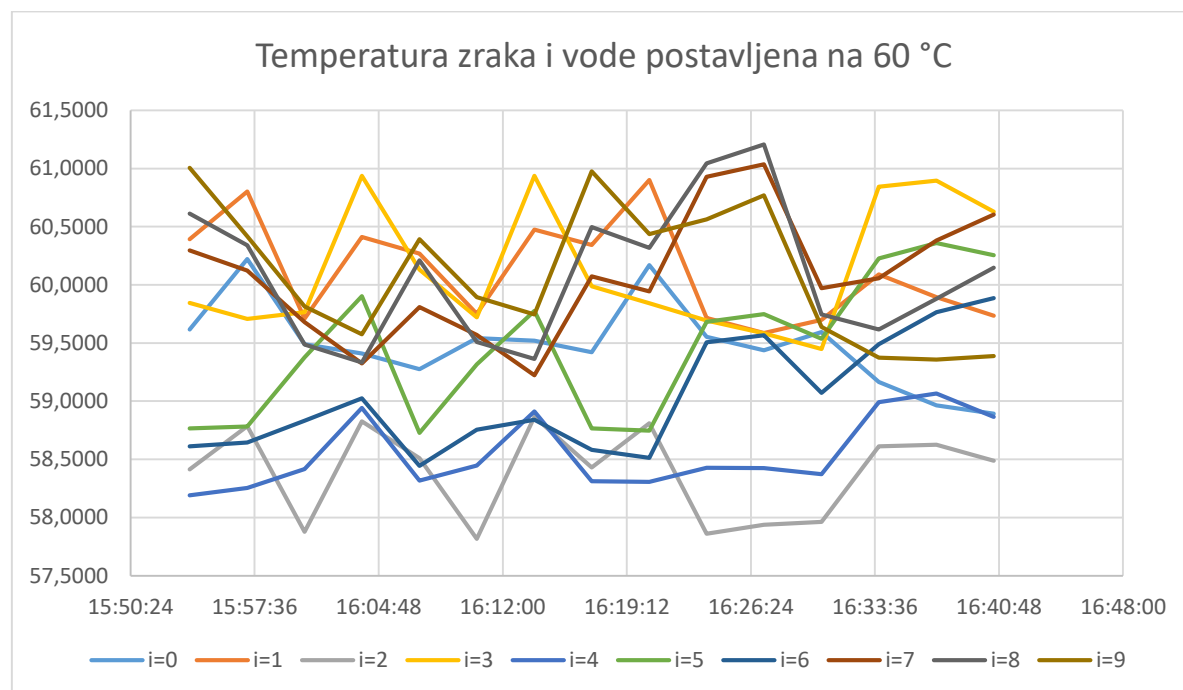
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	30,63	62	Normalna (1σ)	62
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna (2σ)	42,5
δt_{drift}	Klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	30	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		792	Pravokutna	457
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		97	Normalna (1σ)	97
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		22	Pravokutna	13
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	475	mK			
$U_{k=2} =$	950	mK			

Tablica 19. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 30 °C

9.4.3. Postavljena temperatura zraka i vode u komori: 60 °C

Postavljena temperatura	60,00 °C				
Vrijeme početka mjerenja	15:53:50				
Vrijeme zavšetka mjerenja	16:40:30				
Očitanja termometara					
Oznaka mjerene lokacije	t_0	t_1	t_2	$t_{3(\text{Zrač})}$	t_4
Temperatura, °C	59,48	60,12	58,39	60,13	58,55
u_stab, °C	0,093	0,111	0,101	0,143	0,079
Oznaka mjerene lokacije	t_5	t_6	t_7	$t_{8(\text{STD})}$	t_9
Temperatura, °C	59,46	59,04	60,07	60,09	60,09
u_stab, °C	0,154	0,125	0,136	0,153	0,152
t_{\max} , °C	60,13				
t_{\min} , °C	58,39				
$t_{\max} - t_8$, °C	0,04				
$t_8 - t_{\min}$, °C	1,70				
Utjecaj zračenja, $ t_3 - t_8 $, °C	0,043				
Temperaturna nehomogenost, °C	1,70				

Tablica 20. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 60 °C.



Slika 23. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama (T = 60 °C)

Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 60 °C

Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	60,09	153	Normalna (1σ)	153
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna (2σ)	42,5
δt_{drift}	Klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	60	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		1699	Pravokutna	981
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		219	Normalna (1σ)	219
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		43	Pravokutna	25
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	1019	mK			
$U_{k=2} =$	2038	mK			

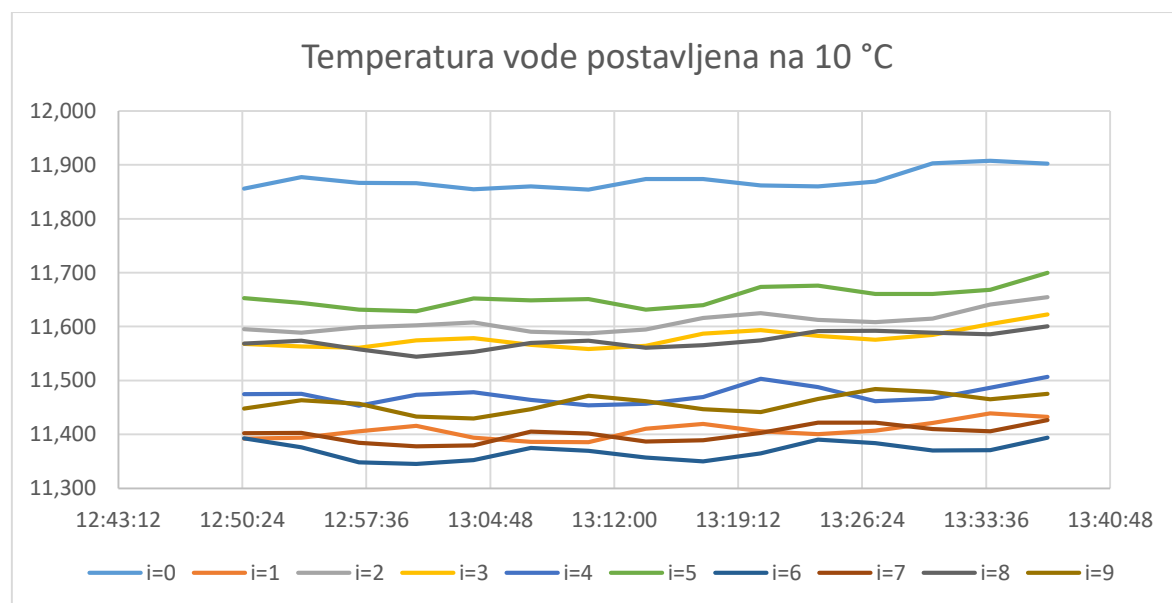
Tablica 21. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 60 °C

9.5. Regulator temperature u komori isključen, a izmjenjivači napajani vodom iz kupke

9.5.1. Postavljena samo temperatura vode u komori: 10 °C

Postavljena temperatura	10,00 °C				
Vrijeme početka mjerenja	12:50:30				
Vrijeme zavšetka mjerenja	13:37:10				
Očitavanja termometara					
Oznaka mjerene lokacije	t_0	t_1	t_2	$t_{3(\text{Zrač})}$	t_4
Temperatura, °C	11,87	11,41	11,61	11,58	11,47
u_stab, °C	0,005	0,004	0,005	0,005	0,004
Oznaka mjerene lokacije	t_5	t_6	t_7	$t_{8(\text{STD})}$	t_9
Temperatura, °C	11,65	11,37	11,40	11,57	11,46
u_stab, °C	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004
t_{\max} , °C	11,87				
t_{\min} , °C	11,37				
$t_{\max} - t_8$, °C	0,30				
$t_8 - t_{\min}$, °C	0,20				
Utjecaj zračenja, $ t_3 - t_8 $, °C	0,006				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,30				

Tablica 22. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 10 °C



Slika 24. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama (T = 10 °C)

Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za samo temperaturu vode u komori postavljenu na 10 °C

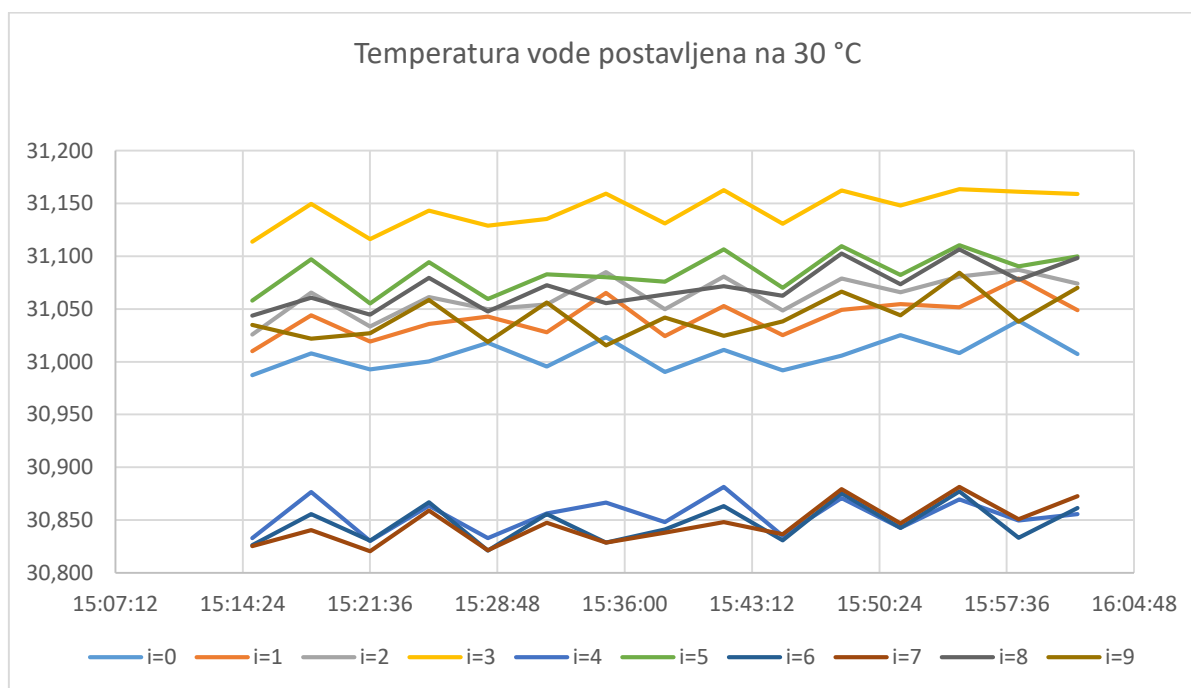
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	11,57	4	Normalna (1σ)	4
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna (2σ)	42,5
δt_{drift}	Klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	10	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		300	Pravokutna	173
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		7	Normalna (1σ)	7
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		6	Pravokutna	3
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	181	mK			
$U_{k=2} =$	362	mK			

Tablica 23. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 10 °C

9.5.2. Postavljena samo temperatura vode u komori: 30 °C

Postavljena temperatura	30,00 °C				
Vrijeme početka mjerenja	15:14:56				
Vrijeme zavšetka mjerenja	16:01:36				
Očitanja termometara					
Oznaka mjerene lokacije	t_0	t_1	t_2	$t_{3(\text{Zrač})}$	t_4
Temperatura, °C	31,01	31,04	31,06	31,14	30,85
u_stab, °C	0,004	0,005	0,005	0,004	0,004
Oznaka mjerene lokacije	t_5	t_6	t_7	$t_{8(\text{STD})}$	t_9
Temperatura, °C	31,08	30,85	30,85	31,07	31,04
u_stab, °C	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
t_{\max} , °C	31,14				
t_{\min} , °C	30,85				
$t_{\max} - t_8$, °C	0,07				
$t_8 - t_{\min}$, °C	0,22				
Utjecaj zračenja, $ t_3 - t_8 $, °C	0,074				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,22				

Tablica 24. Prikaz rezultata ispitivanja komore s postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 30 °C



Slika 25. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama ($T = 30\text{ °C}$)

Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za samo temperaturu vode u komori postavljenu na 30 °C

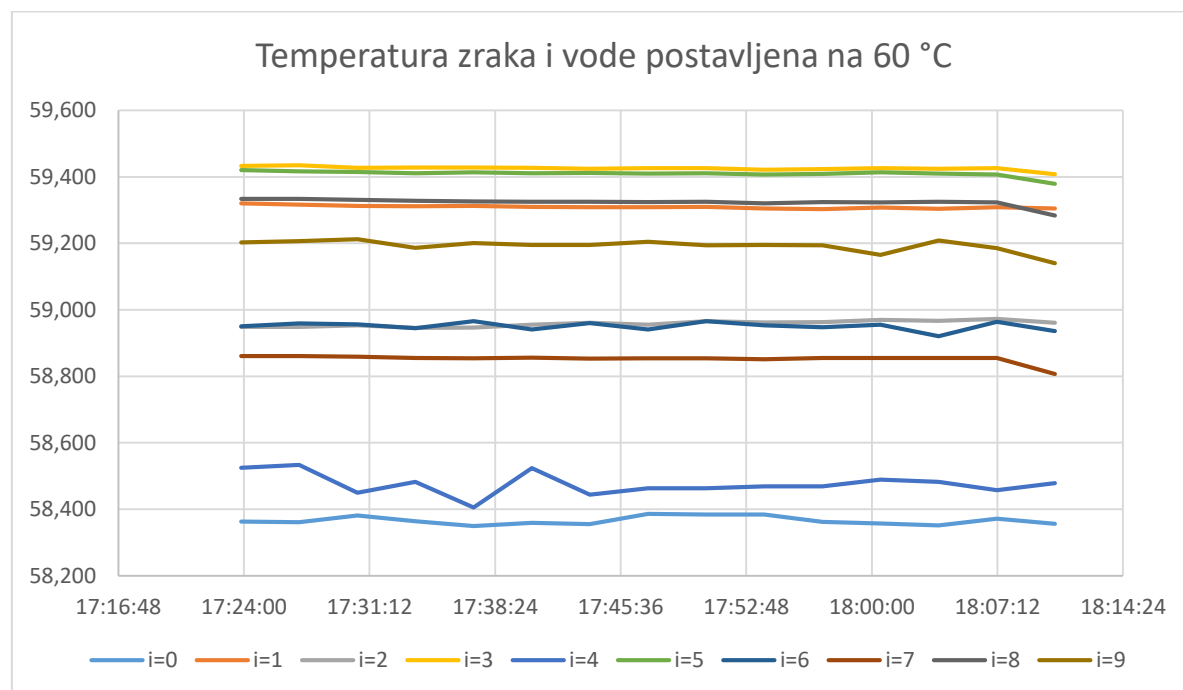
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	31,07	5	Normalna (1σ)	5
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna (2σ)	42,5
δt_{drift}	Klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	30	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		224	Pravokutna	129
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		6	Normalna (1σ)	6
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		74	Pravokutna	43
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	146	mK			
$U_{k=2} =$	292	mK			

Tablica 25. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 30 °C

9.5.3. Postavljena samo temperatura vode u komori: 60 °C

Postavljena temperatura	30,00 °C				
Vrijeme početka mjerenja	17:23:50				
Vrijeme završetka mjerenja	18:10:30				
Očitavanja termometara					
Oznaka mjerene lokacije	t_0	t_1	t_2	$t_{3(\text{Zrač})}$	t_4
Temperatura, °C	58,37	59,31	58,96	59,43	58,48
u_stab, °C	0,003	0,001	0,002	0,002	0,009
Oznaka mjerene lokacije	t_5	t_6	t_7	$t_{8(\text{STD})}$	t_9
Temperatura, °C	59,41	58,95	58,85	59,32	59,19
u_stab, °C	0,002	0,003	0,003	0,003	0,005
t_{\max} , °C	59,43				
t_{\min} , °C	58,37				
$t_{\max} - t_8$, °C	0,10				
$t_8 - t_{\min}$, °C	0,96				
Utjecaj zračenja, $ t_3 - t_8 $, °C	0,102				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,96				

Tablica 26. Prikaz rezultata ispitivanja komore sa postavljenom temperaturom zraka i vode u komori na 60 °C



Slika 26. Prikaz temperatura u komori tokom mjerenja u svim mjernim točkama (T = 60 °C)

Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za samo temperaturu vode u komori postavljenu na 60 °C

Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{std}	Pokazivanje termometra u referentnoj mjernoj točki	59,32	3	Normalna (1σ)	3
δt_{cal}	Kalibracija termometra	0	85	Normalna (2σ)	42,5
δt_{drift}	Klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	60	0	Normalna	0
δt_{inhom}	Prostorna nehomogenost temperature		958	Pravokutna	553
δt_{instab}	Vremenska nestabilnost temperature (30 min)		13	Normalna (1σ)	13
δt_{rad}	Utjecaj zračenja		102	Pravokutna	59
δt_{res}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1} =$	559	mK			
$U_{k=2} =$	1118	mK			

Tablica 27. Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti za temperaturu zraka i vode u komori postavljenu na 60 °C

9.6. Ukupne nesigurnosti komore

	Bez vode u izmjenjivaču	Izmjenjivači napajani vodom iz kupke, regulator temperature u komori uključen	Izmjenjivači napajani vodom iz kupke, regulator temperature u komori isključen
Temperatura, °C	Ukupna nesigurnost ($k=2$), mK	Ukupna nesigurnost ($k=2$), mK	Ukupna nesigurnost ($k=2$), mK
10	1150	956	362
30	996	950	292
60	2346	2038	1118

Tablica 27. Prikaz ukupnih mjernih nesigurnosti komore

10. ZAKLJUČAK

U radu je navedena uputa za ispitivanje termostatiranih komora. Na temelju upute postavljena je mjerna linija u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje pomoću koje je ispitana postojeća termostatirana komora InkoLAB, model BTF200EN. Termostatirana komora ispitana je u temperaturnim točkama 10 °C, 30 °C i 60 °C te su za svaku temperaturu iskazane pripadne mjerne nesigurnosti koje se moraju uzeti u obzir prilikom korištenja komore. Nadalje, originalna komora dodatno je opremljena izmjenjivačima topline ugrađenim na sve unutrašnje stijenke njenog radnog prostora. Ovi izmjenjivači napajaju se vodom iz termostatirane kupke s ciljem smanjivanja ukupne nesigurnosti komore. Ovim radom potvrđena je opravdanost upotrebe izmjenjivača budući da su u tom slučaju ukupne nesigurnosti bile znatno manje. Za procjenu ukupnih mjernih nesigurnosti komore u odabranim temperaturnim točkama (s i bez izmjenjivača) u obzir su uzete sljedeće sastavnice: temperaturni gradijenti, stabilnost temperature, utjecaj zračenja, rezolucija regulatora komore kao i nesigurnosti opreme koja je korištena za ispitivanje. Pojedinačne vrijednosti navedenih komponenata nesigurnosti određene su ispitivanjima provedenim u okviru ovog rada. Iz rezultata je vidljivo da su najveći utjecaj na mjernu nesigurnost komore imali upravo od nehomogenost i nestabilnost temperature u korisnom prostoru komore, dok je utjecaj korištenih etalonskih mjernih uređaja bio znatno manji. Također je važno istaknuti kako su vrijednosti ukupne nesigurnost komore najmanji na temperaturi zraka od 30 °C, kada je intenzitet izmjene topline komore i okoline minimalan.

Utvrđilo se kako su ukupne mjerne nesigurnosti pri temperaturama od 10 °C, 30 °C i 60 °C najmanje u slučaju gdje su izmjenjivači napajani vodom iz kupke, a regulator temperature u komori isključen, što je bilo i za očekivati jer je komora zamišljena za takav režim rada. Mjerenja su obavljena s devet termometara i jednim etalonskim termometrom u referentnoj mjernoj lokaciji. Daljnje unaprjeđenje mjerne linije može se postići dodavanjem ventilatora unutar radnog volumena komore i postavljanje dodatnih termometara kod kojih bi se temperature zraka mjerile u više prostornih točaka.

LITERATURA

- [1] CP-VL03 HMI/FSB-LPM: Calibration of climatic and thermostated chambers
- [2] Guideline DKD-R 5-7 : Calibration of climatic Chambers
- [3] International Organization for Standardization: A guide to Expression of Uncertainty in Measurement